

SÉRIE A, NUMÉRO 882

NUMÉRO D'ORDRE : 1697

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

par

P. IDRAC

RÉPÉTITEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

1^{re} THÈSE. - Etudes expérimentales sur le vol à voile

2^e THÈSE. - Propositions données par la Faculté

Soutenues le *43 Decr* 1921, devant la Commission d'Examen

MM. MARCHIS.....

Président

PERRIN.....

MAURAIN.....

} Examinateurs



PARIS

L'AÉROPHILE

Revue Technique et Pratique des Locomotions Aériennes

35, Rue François-1^{er}, 35 - 8^e arr.

1921

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

par

P. IDRAC

RÉPÉTITEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

1^{re} THÈSE. - Etudes expérimentales sur le vol à voile

2^e THÈSE. - Propositions données par la Faculté

Soutenues le *13 Dec* 1921, devant la Commission d'Examen

MM. MARCHIS.....

Président

PERRIN.....

Examineurs

MAURAIN.....



PARIS

L'AÉROPHILE

Revue Technique et Pratique des Locomotions Aériennes

35, Rue François-I^{er}, 35 - 8^e arr.

1921



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556008_0029

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen MOLLIARD, *Professeur*. Physiologie végétale.

Doyen honoraire P. APPELL.

Professeurs honoraires. {
P. PUISEUX.
VÉLAIN.
BOUSSINESQ.
BOUTY.

Professeurs LIPPMANN Physique.
E. PICARD Analyse supérieure et algèbre supérieure.
Gaston BONNIER Botanique.
KOENIGS Mécanique physique et expérimentale.
GOURSAT Calcul différentiel et calcul intégral.
HALLER Chimie organique.
JOANNIS Chimie (Enseignement P. C. N.)
JANET Electrotechnique générale.
WALLERANT Minéralogie.
ANDOYER Astronomie.
PAINLEVÉ Mécanique analytique et mécanique céleste.
HAUG Géologie.
H. LE CHATELIER Chimie générale.
Gabriel BERTRAND Chimie biologique.
Mme P. CURIE Physique générale.
CAULLERY Zoologie (Evolution des êtres organisés).
C. CHABRIÉ Chimie appliquée.
G. URBAIN Chimie minérale.
Emile BOREL Calcul des probabilités et Physique mathématique.
MARCHIS Aviation.
Jean PERRIN Chimie physique.
G. PRUVOT Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
MATRUCHOT Botanique.
ABRAHAM Physique.
CARTAN Mécanique rationnelle.
Cl. GUICHARD Géométrie supérieure.
LEBESGUE Application de l'analyse à la géométrie.
LAPICQUE Physiologie.
GENTIL Géographie physique.
VESSIOT Calcul différentiel et calcul intégral.
COTTON Physique théorique et Physique céleste.
DRACH Mathématiques générales.
C. FABRY Physique.
Charles PÉREZ Zoologie, anatomie, physiologie comparée.

LEDUC Physique.
HÉROUARD Zoologie.
Léon BERTRAND Géologie.
Rémy PERRIER Zoologie (Enseignement P. C. N.).
LESPIEAU Chimie.
SAGNAC Physique (Enseignement P. C. N.).
RABAUD Biologie expérimentale.
PORTIER Physiologie.
BLAISE Chimie organique.
PÉCHARD Chimie (Enseignement P. C. N.).

Secrétaire Daniel TOMBECK.

A MM. DESLANDRES & PÉROT

Hommages de respectueuse reconnaissance

Études expérimentales sur le Vol à Voile

INTRODUCTION

On a donné le nom de vol à voile aux évolutions de certains grands oiseaux, qui parcourent l'espace, montent et descendent à leur gré, sans donner aucun mouvement des ailes.

Dans ce système de vol, l'oiseau plane sur place ou évolue sans effort apparent et sans dépenser aucune force musculaire.

L'homme qui n'a pas attendu jusqu'au ^{xx}e siècle pour s'essayer au métier d'oiseau, a cherché depuis longtemps à saisir le mécanisme de ce vol paradoxal et avant même l'invention des aéroplanes des observateurs sagaces en avaient analysé les mouvements et tenté de les expliquer.

Malheureusement, ce genre de vol est rare en Europe, où on ne l'observe que tout à fait accidentellement. Aussi bien des personnes ont-elles nié son existence. Mouillard le déplore et ses observations précises et scrupuleuses, pleinement confirmées depuis par d'autres observateurs, ne laissent aucun doute sur l'immobilité et la fixité des ailes où l'observateur le plus exercé, ne peut, même muni d'une bonne jumelle, découvrir le moindre mouvement.

Il est d'ailleurs facile de s'en assurer en Afrique où, dans certaines régions, on peut voir, parfois, les oiseaux en plein vol, à quelques mètres de distance seulement.

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE — DESCRIPTION DU VOL A VOILE THÉORIES DIVERSES

DESCRIPTION DU VOL A VOILE

Mouillard est le premier (1) qui ait fait une étude descriptive très complète du vol à voile. On ne saurait donner de plus belle description que celle qu'il nous a laissée du grand vautour africain.

« C'est, dit-il, le roi des flâneurs, toujours à la voile. Ses grandes ailes ne battent que pour « se dérouiller. Il fera 10 kilomètres pour réussir à se poser sans choc, 10 lieues pour avancer « d'une ; il a le temps et a juré de ne jamais battre. Au reste, rien n'est beau comme l'allure de « cet énorme oiseau ; on ne peut en voir passer un sans s'arrêter et contempler cette majesté dans « le mouvement : ce sont d'immenses cercles, parcourus lentement, sans ressauts ni arrêts ; puis, « quand il prend le vol rectiligne, c'est avec une fixité imposante qu'il se meut ; il ne louvoie pas « ni à gauche ni à droite, ni en haut ni en bas : il pénètre... » Et ailleurs (2) :

« Les vautours montent à perte de vue, redescendent à 200 mètres du sol, vont au vent, « avec le vent, à droite, à gauche, parcourant en une heure toute la contrée environnante pour voir « s'il n'y a pas de bêtes mortes plus faciles à aborder et font ce manège des journées entières pro- « duisant vingt ascensions de mille mètres chacune et cent lieues de parcours et tout cela sans avoir « frappé l'air une seule fois. »

À la suite de Mouillard, plusieurs autres écrivains et particulièrement Hankin, dans son remarquable ouvrage « *Animal Flight* » (3), ont donné de bonnes descriptions du vol à voile. Nous renvoyons à cet ouvrage pour son étude détaillée du vol en orbes (« *circling* »), où il reproduit des trajectoires d'oiseaux obtenues en perspective à l'aide d'un miroir et d'un viseur (4), et du vol en ligne droite ou brisée (« *flex-gliding* ») (5). Nous verrons plus loin la cause fort simple qui différencie ces deux genres de vol.

Cet auteur a, de plus, le grand mérite d'avoir établi nettement l'existence du vol à voile dans le cas du vent horizontal nul, chose que n'avait pas vue Mouillard. Il relate, en effet, plusieurs observations de vol à voile (sans perte de hauteur ou même avec gain) au voisinage immédiat de colonnes de fumée montant droites dans le ciel (6).

EXPOSE SUCCINCT DES DIVERSES THEORIES DU VOL A VOILE

En dehors de Mouillard et de Hankin, la plupart des auteurs se sont moins attachés à la partie descriptive, pour rechercher le procédé mystérieux qu'employaient les oiseaux pour voler sans dépense apparente d'énergie.

Parmi ces théories, les seules reposant sur une base mécaniquement acceptable, sont celles qui font appel à l'énergie **interne** de l'air ; l'oiseau ne dépensant aucun travail musculaire, il faut nécessairement qu'il tire du milieu ambiant l'énergie nécessaire à sa sustentation.

(1) Voir *L'Empire de l'air*, par MOUILLARD, 1881, p. 26.

(2) *L'Empire de l'air*, p. 203.

(3) HANKIN : *Animal Flight. A record of observations*. London, Hife and Sons, 1913.

(4) *Animal Flight* (pp. 41, 54, 57, 58).

(5) *Animal Flight* (p. 32 et suivantes).

(6) *Animal Flight* (p. 38 et suivante).

Nous laisserons de côté les théories assez nombreuses qui ont été édifiées sur l'utilisation d'un vent régulier et horizontal. Un tel vent est, en effet, au point de vue aérodynamique, assimilable à un air calme, pour un corps n'ayant aucune liaison avec un point fixe terrestre. Les théories basées sur l'utilisation d'un tel vent ramènent donc le problème au mouvement perpétuel et sont, par suite, inacceptables.

Les autres théoriciens ont envisagé l'utilisation de vents présentant un des caractères suivants :

- 1° Vents comportant des irrégularités de vitesse ;
- 2° Vents superposés en couche mince présentant de grandes différences de vitesse ;
- 3° Vents présentant des irrégularités de direction ;
- 4° Vents présentant une composante verticale ascendante.

La **première théorie** avait été entrevue par Mouillard dans « L'Empire de l'Air » (1); elle a été développée par Bazin dans un mémoire envoyé à l'Académie des Sciences (2), puis par Langley, en 1893, dans un ouvrage intitulé « Le travail interne du vent » (3). Mais c'est surtout Lanchester qui, dans l'« Aerodonic », en 1907 (4), a poussé plus loin cette étude en la soumettant au calcul.

Cette théorie souvent appelée « théorie des montagnes russes » suppose (fait d'ailleurs vérifié par l'expérience) que le vent horizontal a des vitesses essentiellement variables, qu'il souffle par rafale à périodes rapprochées. Pendant les périodes où la vitesse du vent a une valeur supérieure à sa moyenne, l'oiseau profite de l'augmentation de « poussée » du vent pour s'élever, en orientant convenablement ses ailes ; pendant les périodes d'accalmie, au contraire, l'oiseau emploie le gain de hauteur à faire une descente planée ordinaire.

Lanchester arrive à cette conclusion qu'avec des variations rapides de vitesse du vent de l'ordre de celles que l'on observe assez fréquemment, ce vol est théoriquement possible avec des oiseaux ayant un angle de glissement de quelques degrés seulement. Cette théorie nécessite des variations rapides d'incidence des ailes qui ne paraissent guère répondre aux faits observés ; elle est toutefois mécaniquement acceptable, et susceptible a priori de se trouver réalisée par la nature.

Dans la **seconde théorie** exposée par Lilienthal (5) et relatée dans un mémoire posthume de Léon Bollée (6), on suppose que le vent est régulier à une même altitude, mais qu'il n'a pas même vitesse à une hauteur un peu plus ou un peu moins grande et que, dès lors, en passant assez souvent d'une zone dans une autre, l'oiseau peut, par son inertie qui s'oppose aux variations immédiates de vitesse, trouver dans le vent relatif une source d'énergie suffisante à sa sustentation et à sa translation.

Cette théorie revient, en somme, à la théorie des montagnes russes, avec cette différence que les changements de vitesse du vent se font dans l'espace au lieu de se faire dans le temps. Ceci nécessite des mouvements de montée et de descente supplémentaires dans les évolutions de l'oiseau, qu'on ne paraît guère avoir observés ; d'ailleurs de fortes variations de vitesse dans des couches très rapprochées s'observent très rarement.

La **troisième théorie** dite « du vent louvoyant » a eu pour principal auteur M. Alexandre Sée qui l'a exposée dans l'AÉROPHILE (7).

Il admet que le vent est régulier en direction : il louvoie, et, en louvoyant, vient alternativement frapper à droite et à gauche l'oiseau dont l'inertie est suffisante pour obtenir le vent relatif produisant, par une disposition convenable des ailes, l'énergie nécessaire aux évolutions du voilier.

Enfin, la **quatrième théorie** admet que l'oiseau descend en vol plané dans une région où le vent a une composante ascendante. Si la vitesse verticale v de descente de l'oiseau en vol plané est égale en valeur absolue ou inférieure à la vitesse V de montée de l'air environnant, il restera à hauteur constante ou même montera avec une vitesse égale à $V-v$.

Cette théorie a été soutenue par de nombreux auteurs, particulièrement :

Froude dans les « Proceedings de la Société royale d'Edimbourg » (8).

Sir Hiram Maxim dans « Le vol naturel et le vol artificiel » (1909) (9).

Headley dans « The Flight of Birds » (10).

(1) MOUILLARD : *L'Empire de l'air* (1881), p. 47 : « Le coup de vent est une puissance qui est l'âme de l'ascension; c'est la baguette qui frappe le cerceau de l'enfant et lui donne la force de rester debout, de rouler et même de franchir les élévations... »

(2) *Mémoires inédits de l'Académie des Sciences* 1888 et *Revue Scientifique*, A. BAZIN : Théorie et imitation du vol à voile (17 juin 1905, p. 737 et 24 juin 1905, p. 772).

(3) LANGLEY : *The internal Work of the Wind* (Smithsonian contributions to knowledge 1893).

(4) Chap. IX, p. 312.

(5) LILIENTHAL : *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst* (1889).

(6) LÉON BOLLÉE : « Etude du vol à voile des oiseaux » (AÉROPHILE, 1917, p. 245.)

(7) « Le vol à voile et la théorie du vent louvoyant », (L'AÉROPHILE, 1^{er} juin 1909, p. 242.)

p. 256 et tome 18, 1891, p. 65).

(8) FROUDE : « On the soaring of birds » (*Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, tome 15, (1888,

(9) Chapitre II, p. 17.

(10) Chap. X, p. 141.

Et Léon Bollée dans un mémoire posthume publié par l'AÉROPHILE (1).

Mouillard et beaucoup d'autres l'ont rejetée comme inadmissible, car ils n'ont considéré que les courants ascendants dus à la dérivation du vent par un obstacle ; circonstance tout à fait particulière qui ne peut expliquer que quelques rares cas de vol à voile.

Hankin, néanmoins, a bien entrevu la possibilité, pour les oiseaux, d'utiliser les tourbillons de chaleur ; il a même essayé de les étudier :

« Le mouvement de l'air, écrit-il (2), se voit le mieux en observant un objet éloigné, par exemple les lignes horizontales d'un bâtiment, à travers une lunette bien fixée : on voit l'image dans un mouvement de tremblement dû aux masses d'air échauffées, qui s'élèvent. »

Il donne le nom de « Heat eddies » à ce phénomène et conclut de ses observations que si on observe souvent du vol à voile en même temps que les « Heat eddies », néanmoins le vol à voile peut très bien se produire sans que l'on observe cette apparence et réciproquement. Ceci prouve, dit-il, que ce phénomène n'est pas la cause de l'autre (3).

Or, nous verrons plus loin qu'il peut parfaitement se produire des tourbillons de chaleur sans qu'il y ait apparence de tremblement des objets éloignés, ainsi que l'ont montré nos expériences décrites plus loin.

Les deux phénomènes ne sont donc pas nécessairement corrélatifs.

Telles sont brièvement exposées les différentes explications qu'on a données jusqu'à ce jour de ce vol étrange.

Pour décider entre elles, le plus simple semblait être de faire appel à l'expérience et d'étudier, sur place, les différentes formes de l'énergie interne de l'air capables d'être utilisées par les voiliers. Il était permis d'espérer que l'on aurait ainsi une base suffisante pour déterminer la cause effective du vol à voile et peut-être même pour avoir une donnée sur la quantité d'énergie captée par les oiseaux et leur rendement aérodynamique.

C'est cette étude expérimentale que nous nous sommes efforcés d'entreprendre et dont nous allons maintenant commencer l'exposé.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DES PROCÉDÉS EXPÉRIMENTAUX EMPLOYÉS POUR ÉTUDIER LE VOL À VOILE

Nos expériences (4) ont porté sur la nature et la grandeur des sources d'énergie interne de l'air utilisables par les oiseaux aux points même où ils évoluaient.

Or, les sources d'énergie interne de l'air à étudier peuvent se différencier en énergie **statique** et énergie **dynamique**.

Les premières nous ont amené à étudier les variations de température et de pression aux points d'évolution des oiseaux ; les secondes, les irrégularités de vitesse du vent, ses variations de direction et la composante verticale de sa vitesse.

Nous commencerons par l'exposé des méthodes employées pour étudier les variations de température et de pression de l'air.

(1) LÉON BOLLÉE : « Etude sur le vol à voile des oiseaux ». (*L'Aérophile*, 1917, pp. 245 et 280).

(2) HANKIN : *Animal Flight*, p. 263.

(3) HANKIN : *Animal Flight*, p. 275.

(4) Nous adressons à ce sujet nos remerciements à la Direction des Inventions qui, par son aide, nous a grandement facilité l'exécution de nos travaux.

PREMIÈRE PARTIE

Etude des sources d'énergie interne statique de l'air

Variations de température et de pression

Pour nous placer au voisinage des oiseaux volant à voile, nous avons utilisé des cerfs-volants servant de support à des appareils dont nous allons donner la description et qui, au moyen de fils électriques courant le long du câble du cerf-volant, permettaient d'étudier du sol ce qui se passait en l'air.

1° Mesure des températures.

L'appareil employé est basé sur les variations avec la température de la résistivité du platine.

Il se compose d'une spirale formée de fil de platine de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur et dont la résistance totale est d'environ 300 ohms. Cette spirale est mise à l'abri des rayons solaires dans un tube noirci ouvert à ses deux extrémités pour permettre la circulation de l'air. Elle est fixée au cerf-volant et reliée au sol par des fils électriques courant le long du câble du cerf-volant. Ces fils aboutissent à l'un des bras d'un pont de Wheastone dont on règle convenablement les résistances pour qu'au début de l'expérience le galvanomètre soit au 0. La disposition schématique de l'appareil est indiquée figure 1.

Les résistances de la boîte à pont étant en constantan, sont indépendantes de la température. Si la température de l'air varie au voisinage du cerf-volant, le galvanomètre déviara d'une quantité qui, après étalonnage préalable, permettra d'évaluer les variations de température. Les dimensions du fil de platine, sa résistance totale et la force électro-motrice de la pile avaient été choisies de telle sorte que l'échauffement du fil par le passage du courant soit complètement inappréciable, de sorte que les variations de résistance de la spirale soient uniquement dues aux variations de température de l'air ambiant. On s'en était d'ailleurs assuré en plaçant l'appareil dans une soufflerie envoyant de l'air à température constante avec une vitesse variant de 0 à 20 mètres par seconde. Si l'échauffement du fil avait été appréciable, on aurait dû observer une température plus élevée pour un vent nul que pour un vent de 20 mètres, le refroidissement du courant d'air étant variable avec la vitesse : il n'en a rien été.

Les bras de proportions variables étaient formés par un rhéostat à curseur ρ qui permettait, par la manœuvre de ce curseur, de mettre très rapidement l'appareil au 0 au moment de l'expérience (voir fig. 2).

Le galvanomètre à cadre mobile, construit spécialement pour le transport dans la brousse de l'Afrique, portait une échelle graduée fixe dont on observait dans une lunette l'image donnée par réflexion sur le miroir supporté par le cadre mobile. Il suffisait de lire la division de l'échelle qui était en coïncidence avec le réticule de la lunette.

L'appareil était réglé de telle sorte qu'une petite division de la règle graduée (1/2 millimètre), correspondait à une différence de température de 1/40° de degré centigrade. De plus, l'appareil, ainsi que nous l'avons vérifié au laboratoire, se met en équilibre de température avec l'air ambiant en moins de trois secondes à 1/40° de degré près.

Cet appareil permettait donc d'étudier avec beaucoup de précision les variations de température atmosphérique au point où se trouve le cerf-volant et par conséquent au voisinage du vol à voile.

2° Mesure des pressions.

L'appareil se compose d'un récipient thermiquement isolé de l'extérieur (bouteille thermos). Le goulot de cette bouteille, dirigé vers le bas communique avec un tube à trois branches $t\ t'\ t''$, en verre (voir fig. 3). Le tube t communique avec la bouteille, les deux tubes t' et t'' , symétriques par rapport au tube t , communiquent avec l'extérieur par l'intermédiaire de tampons de ouate T' et T'' destinés à éliminer les effets possibles de pression dynamique due au vent. Une certaine quantité de liquide est introduite dans les tubes communiquant $t\ t'\ t''$.

La différence de niveau entre le tube t et les deux tubes t' et t'' mesurera la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du récipient. L'intérieur du récipient étant à température constante, cette différence de niveau permettra donc d'évaluer les variations de la pression atmosphérique extérieure.

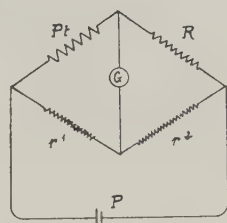


Fig. 1. — Pt , spirale de platine; R , résistance fixe en constantan; r_1 et r_2 , bras de proportion; G , galvanomètre; P , pile.

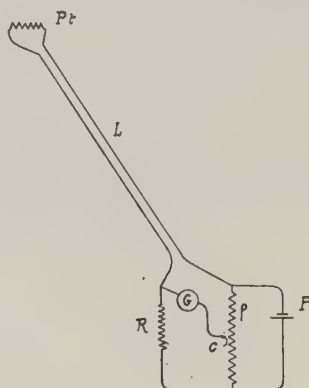


Fig. 2. — P , rhéostat; c , curseur; L , ligne.

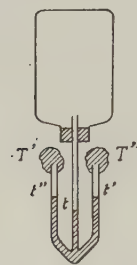


Fig. 3.



Fig. 4.

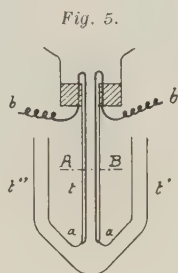


Fig. 6. — Coupe suivant AB de la fig. 5.

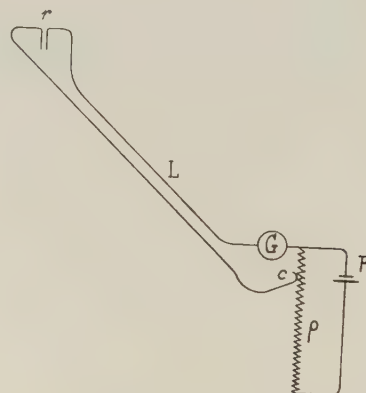


Fig. 7. — r , résistance liquide à sulfate de cuivre; L , ligne; G , galvanomètre; p , potentiomètre; c , curseur; P , pile.

Enfin, la quantité de liquide contenue dans le système $t\ t'\ t''$ du tube étant invariable, on pourra déduire les variations de pression extérieure de la seule hauteur du liquide dans le tube médian t . La disposition des tubes t' et t'' a été adoptée pour rendre les indications de l'appareil (c'est-à-dire la hauteur du liquide dans le tube t) indépendantes de l'inclinaison de l'appareil sur la verticale, ce qui est indispensable, l'instrument destiné à être porté par un cerf-volant, ne pouvant être soustrait aux oscillations de ce dernier. Si l'appareil est incliné (fig. 4) le niveau du liquide dans la tige médiane ne changera pas, les tubes t' et t'' étant symétriques.

Reste à transmettre au sol la hauteur du liquide dans le tube t . Pour cela deux fils de cuivre fin pénètrent dans le tube t et se terminent en $a\ a'$ (fig. 5 et 6). Ils sont appliqués contre la paroi du tube comme l'indique la figure et sont reliés en $b\ b'$ à une ligne à deux conducteurs courant le long du câble du cerf-volant.

Le liquide manométrique de l'appareil contenu dans les tubes $t\ t'\ t''$ se compose d'une solution très diluée de sulfate de cuivre pur dans de l'eau distillée. La résistance ohmique entre les bornes $b\ b'$, sera fonction de la hauteur du liquide dans ces tubes. Il suffira donc de mesurer au sol cette résistance, pour en déduire la hauteur du liquide et, par conséquent, la différence de pression entre le réservoir athermane et l'extérieur.

Pour cela, on branche la résistance liquide en série avec un galvanomètre et une force électromotrice faible de l'ordre de $1/20^e$ de volt obtenue en réduisant convenablement, au moyen d'un potentiomètre d'environ 1000 ohms de résistance totale, la force électromotrice d'une pile. Le schéma du montage est indiqué sur la figure 7.

La mesure de la déviation du galvanomètre permettra, après étalonnage, de déterminer la hauteur du liquide et par conséquent les variations de pression.

Notons en passant que nous avons pu, avec cet appareil, en réglant convenablement les valeurs de la force électromotrice utilisée, la sensibilité du galvanomètre et la concentration de la solution de sulfate de cuivre, obtenir un statoscope extrêmement sensible, qui, dans notre laboratoire, nous a permis de déceler des différences de niveau de moins de 5 centimètres.

Une pareille précision est d'ailleurs illusoire dans le cas qui nous occupe, puisqu'il faut faire intervenir en ligne de compte les variations de hauteur du cerf-volant, qu'on ne peut pratiquement évaluer à plus de 1 mètre près. Il suffit donc de rechercher la précision de $1/10^{\circ}$ de millimètre de mercure de pression.

Nous verrons plus loin que ces variations de pression, d'ailleurs très faibles, sont sans influence sur le vol à voile.

Les variations de température, au contraire, paraissent être la cause, non pas directe, mais **indirecte** du vol des grands voiliers africains.

Mais avant de parler des résultats expérimentaux qui nous ont conduit à cette conclusion, il nous faut entamer l'exposé un peu aride et long des différentes méthodes employées pour mesurer l'énergie interne cinétique de l'air, qui est la cause directe du vol à voile.

DEUXIÈME PARTIE

Etude des sources d'énergie interne dynamique de l'air.

Irrégularités de vitesse et de direction du vent,

Composante ascendante

Cette énergie cinétique, ainsi que nous l'exposons plus haut, peut provenir soit des irrégularités de vitesse du vent, soit de ses irrégularités de direction, soit enfin d'une valeur non nulle de la composante verticale du vent.

1° ETUDE DES IRREGULARITES DE VITESSE DU VENT

Les irrégularités de vitesse du vent sont étudiées en se servant d'un cerf-volant dont la tension du câble est enregistrée au moyen d'un dynamomètre enregistreur. Les expériences ont montré que la traction du câble est fonction de la vitesse de vent (et sensiblement proportionnelle au carré de cette vitesse). Cette fonction a été expérimentalement déterminée dans les conditions suivantes :

1° A l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr en fixant au cerf-volant un anémomètre Robinson très léger, correspondant avec un enregistreur instantané de Richard au moyen de fils très fins fixés à la ficelle du cerf-volant ;

2° Au Ministère des Inventions, par M. Rothé et moi, en fixant le cerf-volant à une automobile dont la vitesse était déterminée par un compteur. On choisissait autant que possible une route perpendiculaire au vent et un vent de faible intensité dont la direction et la vitesse étaient déterminées par expériences croisées au début et à la fin de l'expérience et par approximations successives en se servant du cerf-volant lui-même ;

3° Le cerf-volant a été également comparé à un anémomètre Rothé à oscillations électriques placé près de la nacelle du ballon captif, au voisinage immédiat du cerf-volant observé de terre.

Les résultats de ces expériences étant concordants, on peut conclure que les variations de vitesse du vent susceptibles d'être utilisées par l'oiseau sont celles données par les courbes de l'enregistreur. Il faut toutefois, ainsi que l'ont montré les expériences faites à Saint-Cyr, que la longueur du câble ne dépasse pas une certaine limite, la courbure de la ficelle formant ensuite amortisseur, pour les irrégularités de faible durée.

Description des cerfs-volants employés.

Les cerfs-volants employés (1), d'environ 1 mètre de haut sur 1 m. 80 d'envergure, étaient de la forme indiquée sur la figure 8. Ils comportent deux ailes triangulaires D F E, D' F' E' et deux cellules prismatiques triangulaires F G B b F' G' et H. E b' B' H' E' en avant du plan des

(1) Du type de ceux mis en service comme anémomètres au Ministère des Inventions, pendant la guerre. Pour une description plus complète voir la Notice sur le cerf-volant anémomètre, éditée par les soins du Service Géographique de l'Armée, en 1918.

Fig. 8. — Cerf-volant vu de face.

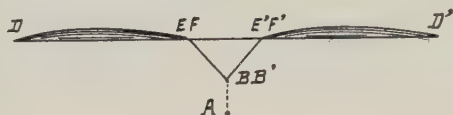
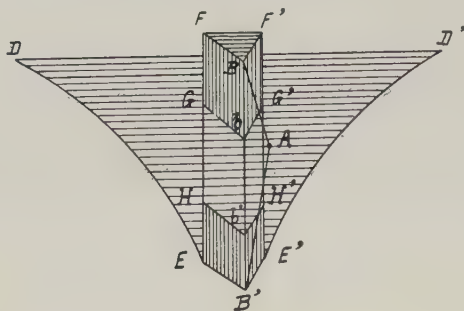


Fig. 9. — Cerf-volant vu de bout.

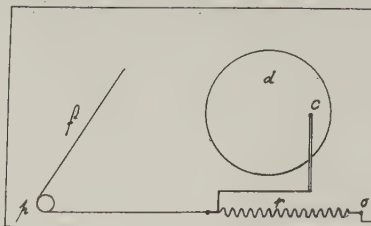


Fig. 10. — Schéma du dynamomètre enregistreur. *r*, ressort à boudin ; *o*, point fixe du ressort ; *c*, style inscripteur ; *d*, disque-enregistreur ; *p*, poulie ; *f*, ficelle attachée au cerf-volant.

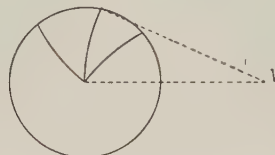


Fig. 11.

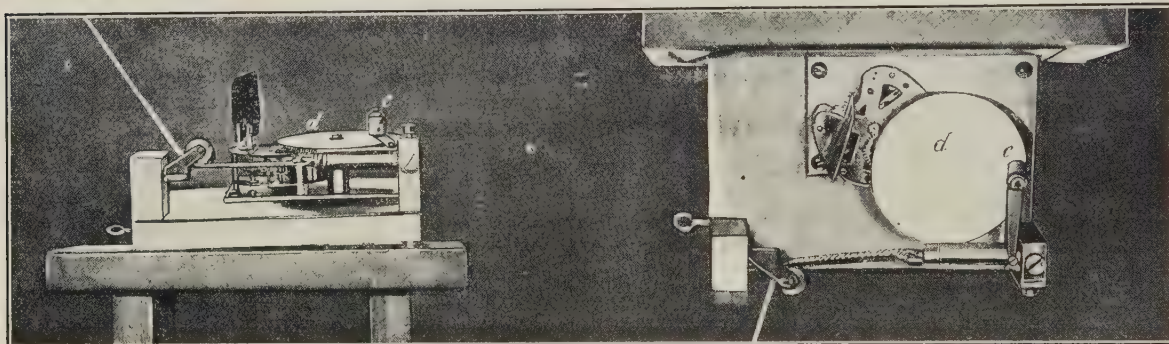


Fig. 10 bis. — Photographie du dynamomètre enregistreur.

ailes. Les cellules ont leurs faces planes ; les ailes, au contraire, sont courbes, ce que l'on obtient en donnant aux bords D E D' E' de l'aile une longueur supérieure à la distance D E (ou D' E') comptée suivant une ligne droite.

Le point d'attache A du câble se trouve au point de rencontre de deux ficelles B A, B' A, de longueurs bien déterminées, issues des points B et B' (1).

Dynamomètre enregistreur.

Le dynamomètre enregistreur est représenté sur la figure 10. Le dynamomètre est constitué par un ressort convenablement étalonné qui porte un crayon C dont les indications sont inscrites sur un disque de papier *d* qui tourne autour de son centre, entraîné par un mouvement d'horlogerie. On a ainsi une courbe en coordonnées polaires, les distances au centre étant proportionnelles aux tractions (et par conséquent une fonction connue des vitesses) et les angles au centre proportionnels aux temps. Cette disposition a été adoptée, de préférence à l'enregistrement habituel sur un cylindre, en raison de sa simplicité, de son encombrement moindre et de son poids minime (2), qui sont des conditions primordiales pour des expériences destinées à être faites dans la brousse de l'Afrique.

2° ETUDE DES IRREGULARITES DE DIRECTION DU VENT

Les changements de direction du vent peuvent se déduire de l'azimut dans lequel se trouve le cerf-volant. Un autre enregistreur a donc été construit, donnant les variations d'azimut en fonc-

(1) Nous adressons à ce sujet nos remerciements à M. NERLOW pour tout le soin et l'habileté avec lesquels il a construit les cerfs-volants que nous avons utilisés.

(2) L'appareil complet pèse 450 gr. et présente un encombrement de 0 m. 14 × 0 m. 10 × 0 m. 06.

tion du temps. Le crayon inscripteur était cette fois lié à un plan vertical contenant l'axe optique d'un viseur avec lequel on suivait le cerf-volant. Le plan vertical qui contenait l'azimuth du cerf-volant était mobile autour d'un axe vertical V (fig. 11). Le crayon inscripteur laissait sa trace sur un disque de papier mobile, comme dans le cas du dynamomètre enregistreur. On obtenait ainsi un diagramme polaire à rayons courbes (voir fig. 11), les angles au centre étant proportionnels au temps et les distances au centre comptées suivant les rayons vecteurs courbes étant proportionnels aux azimuths des cerfs-volants.

Ceci ne permet pas, toutefois, de se rendre compte des irrégularités instantanées de direction du vent. En effet, l'inertie du cerf-volant l'empêche de prendre instantanément la direction du vent, et les irrégularités de l'ordre d'une fraction de seconde seraient impossibles à déceler par ce procédé.

Pour se rendre compte si de telles variations se produisent, on fixe au câble, près du cerf-volant, une banderolle en mousseline de soie très légère qui obéit aux moindres fluctuations du vent et qu'on observe du sol avec une lunette contenant un réticule.

Ces variations instantanées de direction sont d'ailleurs extrêmement rares, sauf au voisinage immédiat du sol, et, ainsi que l'ont montré nos expériences, sans relations avec le vol à droite.

3° ETUDE DE LA COMPOSANTE VERTICALE DE LA VITESSE DU VENT

Deux procédés ont été utilisés pour étudier la composante verticale de la vitesse du vent, suivant que le vent avait une vitesse inférieure ou supérieure à 4 mètres par seconde.

Dans le premier cas, nous utilisons la méthode du ballon-sonde et dans le deuxième cas la méthode du cerf-volant anémomètre et de la banderolle.

A. — Procédé du ballon-sonde.

Le principe de ce procédé est le suivant :

Un ballon en caoutchouc, gonflé d'hydrogène et abandonné dans une atmosphère dénuée de courants ascendants, monte avec une vitesse connue v_0 , fonction de ses dimensions et de sa force ascensionnelle. Si, entre les temps t_1 et t_2 , le vent a une composante ascendante moyenne v , elle s'ajoutera à v_0 et, dans cet intervalle de temps, le ballon sera monté d'une quantité :

$$h = (v + v_0) (t_2 - t_1).$$

Si on détermine directement la valeur h , on pourra en tirer v .

La première idée qui se présente à l'esprit est de déterminer h au moyen de deux théodolites et d'une base terrestre. Mais, en Afrique, il nous était impossible de compter sur un second observateur. Nous avons donc employé le procédé suivant qui ne nécessite qu'un seul opérateur.

C'était le ballon qui emportait la base (longueur un mètre) et on le suivait avec une lunette de Rochon permettant de déterminer l'angle sous lequel se voit la base. On a ainsi la distance ; l'angle avec l'horizon permet de calculer h .

Les appareils employés se composent d'une lunette de Rochon montée sur cercles gradués et d'un générateur d'hydrogène.

a) Lunette de Rochon (fig. 13).

C'est une lunette munie, entre l'objectif et l'oculaire, d'un prisme biréfringent qui donne une double image de l'objet, ab et $a'b'$, par exemple (fig. 12). On déplace le prisme suivant l'axe optique de la lunette de manière que les deux images soient tangentes. Connaissant la longueur ab , qui dans le cas présent sera de 1 mètre, on pourra connaître la distance en fonction de la position du prisme, déterminée par une graduation sur le corps de la lunette. La lunette est montée, comme l'indique la figure 13, sur deux cercles gradués, le cercle horizontal étant muni d'un niveau à bulle.

b) Générateur d'hydrogène.

La nécessité d'avoir un matériel extrêmement transportable nous a conduit à l'appareil suivant :

Il se compose (fig. 14) d'un tube de cuivre E de 3 centimètres de diamètre environ sur 10 de long, bouché à ses deux extrémités par des bouchons de liège terminés par deux petits tubes t_1 et t_2 . Le tube t_1 communique par l'intermédiaire d'un tube de caoutchouc avec une poire aspirante et foulante P à laquelle est fixée le ballon. En enlevant un des bouchons, on introduit dans l'appareil quelques grammes d'hydrure de calcium, puis l'ayant refermé, on fait plonger le tube t_2 dans un peu d'eau. Faisant fonctionner la poire, une certaine quantité d'eau est aspirée dans l'appareil : elle décompose l'hydrure qui donne de l'hydrogène que l'on chasse au moyen de P dans le ballon. Une tubulure auxiliaire t_3 communique avec un ballon dégonflé qui emmagasine le gaz si la pression intérieure devient trop forte.

Le mode opératoire est le suivant :

Le ballon est gonflé à un diamètre de 18 centimètres. Au moyen d'un fil on y suspend une pièce de papier de soie noir tel que la longueur A B soit égale à 1 mètre. On équilibre le système de telle sorte qu'avec une surcharge de 0 gr. 25, il soit en équilibre dans une atmosphère calme. Pour cela, on le compare, dans un endroit à l'abri du vent, avec de petits fragments de

duvet dont la vitesse de chute est d'environ 0 m. 10 par seconde. On enlève ensuite le poids de 0 gr. 25 et on laisse partir le ballon. On le vise avec la lunette de Rochon et l'on fait, à des intervalles de temps convenables, des mesures en amenant l'extrémité A d'une image à être tangente à l'extrémité B de l'autre (fig. 15).

Voyons quels sont les causes d'erreurs de cette méthode et la précision que l'on peut en attendre.

Précision obtenue.

1° Equilibre du ballon. — Etant donnée la difficulté d'avoir un endroit parfaitement calme, il y a lieu d'estimer que l'on peut faire une erreur de 0 m. 10 par seconde sur cette évaluation. Mais les expériences faites dans une pièce où l'air était au repos, ont montré que la force ascensionnelle du ballon étant f et sa vitesse de régime v , on a très sensiblement $f = KV^2$. De cette formule on

tire en différentiant logarithmiquement $\frac{\Delta f}{f} = 2 \frac{\Delta V}{V}$

D'où

$$\Delta V = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{f} \times v = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{\sqrt{Kf}}$$

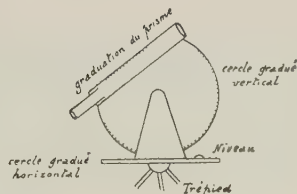


Fig. 13.

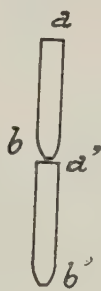


Fig. 12.

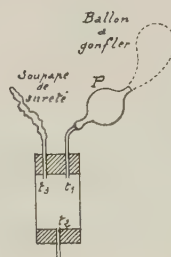


Fig. 14.

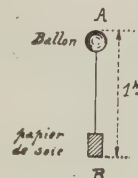


Fig. 15.

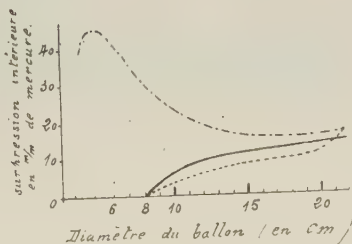


Fig. 17.

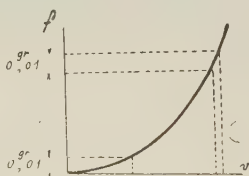


Fig. 16.

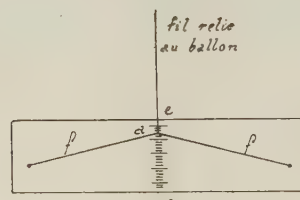


Fig. 18.

Donc, l'erreur possible sur ΔV sera d'autant plus petite, pour une erreur Δf donnée, que sera plus grand. Pour $v=0$ m. 10 on a $f=0$ gr. 01. Une erreur de 0 m. 10 sur l'équilibrage du ballon équilibré ne correspond qu'à une erreur de 0 gr. 01 sur f ce qui, sur la vitesse finale de 0 m. 50 du ballon délesté, ne donne qu'une erreur de 0 m. 01 par seconde (voir fig. 16).

2° Vitesse de régime du ballon. — Elle a été déterminée par de nombreuses expériences faites dans un bâtiment clos. On peut objecter que la vitesse dans l'air libre qui est troublé est différente de la vitesse en air calme. C'est d'ailleurs ce que l'on constate pour les ballons de plus grandes dimensions montant à des vitesses de 3 à 5 mètres par seconde. Hergesell (1) a constaté que de semblables ballons montaient en air libre avec une vitesse de 10 % supérieure à celle qu'ils avaient en air calme (intérieur de la cathédrale de Strasbourg). Ce phénomène avait été précédemment indiqué par Wenger (2) et j'ai eu moi-même l'occasion de le constater en étudiant le dégonflage de 150 sondages à 2 théodolites faits à la station météorologique de Dugny (Seine). Mais les expériences faites dans les dernières années à Göttingen et à l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr ont montré que la différence de résistance entre l'air calme et agité diminuait beaucoup avec la vitesse du vent. On peut conclure des nombres trouvés qu'un air agité n'augmenterait pas de plus de 2 à 3 % la vitesse des ballons employés, aux petites vitesses de moins de 1 mètre auxquelles se pratiquent nos expériences.

1) Annales de l'Observatoire de Lindenberg.
2) Annalen der Hydrographie.

3° Influence de la pression. — Elle a été calculée en tenant compte de la surpression intérieure du ballon, due à la tension du caoutchouc. Cette surpression est indiquée pendant le gonflement du ballon par les courbes de la figure 17. La courbe hachurée correspond au cas où le ballon est gonflé pour la première fois, la courbe pointillée correspondant au dégonflement et la courbe pleine au gonflement suivant. C'est celle-ci qui est pratiquement intéressante, car le ballon est toujours essayé une première fois à l'air avant d'être gonflé à l'hydrogène. On voit qu'à partir de son diamètre normal 0 m. 18, la surpression reste sensiblement constante. Elle augmente seulement de 1/2 millimètre de mercure pour 1 centimètre d'augmentation de diamètre, ce qui correspond à une augmentation d'altitude de plus de 1.000 mètres.

Dans ces conditions on trouve que l'augmentation de vitesse ascensionnelle est seulement de 0 % 5 par seconde pour 500 mètres d'altitude, ce qui est tout à fait négligeable.

Ces conclusions ont été vérifiées par des essais expérimentaux sous la cloche pneumatique ; ils ont montré qu'un ballon équilibré le restait sensiblement pour un abaissement de pression de moins de 100 millimètres.

4° Influence de la température. — Si le ballon est en équilibre de température avec l'extérieur, la température est sans influence pour une différence de quelques degrés. Une différence de température entre le ballon et l'extérieur peut au contraire avoir une influence appréciable. Le calcul montre que la vitesse ascensionnelle augmente de 1 centimètre environ pour 1° d'excès de température sur l'extérieur. Des expériences ont été faites en plaçant un thermomètre dans un ballon exposé au soleil d'été dans un endroit abrité du vent. L'excès de température pour les ballons employés n'a jamais dépassé 10°. L'équilibre de température s'établit d'ailleurs assez rapidement (au bout de 2 à 3 minutes) et lorsque l'on équilibre le ballon au soleil il n'y a pas lieu de s'en inquiéter ; cette correction intervient seulement si le ballon passe par des alternatives de soleil et d'ombre ; il faut alors compter sur une erreur possible maxima de 0 m. 10 par seconde.

5° Porosité du ballon. — Les expériences ont montré qu'il fallait compter sur une perte d'au maximum 0 g. 03 en 10 minutes ce qui correspond à une diminution de vitesse ascensionnelle de 3 centimètres par seconde. Si l'expérience dure 20 minutes, ce qui est un maximum, la diminution de vitesse ascensionnelle sera au maximum de 0 m. 06 par seconde.

6° Evaluation de la hauteur. — L'angle avec l'horizon peut être évalué à 5 minutes près environ. Quant à la distance x en mètres elle est donnée en fonction de la graduation de la lunette de Rochon y en millimètres par la formule

$$x(y + 5,6) = 24.600$$

déterminée expérimentalement.

Or, on peut évaluer y à 0 % 3 près. Pour un angle de 20° avec l'horizon, qui est rarement dépassé, l'erreur sur la hauteur sera environ de 5 mètres à 1.000 mètres et de 15 mètres à 2.000 mètres. Au-delà de 3.000 mètres, il faudra employer une lunette plus puissante. Sur une couche de 100 mètres parcourue en 200 secondes, l'erreur sur la vitesse ascensionnelle sera au plus de 0 m. 05 à 1.000 mètres de 0 m. 15 vers 2.000 mètres.

Résumé. — La méthode du ballon permet d'évaluer la vitesse ascensionnelle avec une approximation de 0 m. 10 par seconde environ lorsque le ballon est à une distance d'un millier de mètres au moins ; vers 2.000 mètres, il ne faut plus compter sur plus de 0 m. 20 de précision. A cela, il faut ajouter une erreur probable d'environ 0 m. 05 si le ballon passe par des alternatives de soleil et d'ombre.

N. -B. — Une méthode légèrement différente a été également employée dans quelques cas particuliers. Elle consistait, après avoir donné au ballon une force ascensionnelle correspondant à une vitesse ascendante bien déterminée, à faire à intervalles réguliers, des photographies du ballon. Des dimensions de l'image du ballon (si les expériences se faisaient à petite distance) ou de la distance sur le cliché entre le ballon et le corps noir placé en dessous, on déduisait la distance du ballon. La hauteur au-dessous de l'horizon était déduite de mesures faites sur le cliché par rapport à un horizon artificiel. Cette méthode a été surtout employée dans les expériences faites en mer et sur les côtes de Normandie, ainsi que nous le verrons plus loin.

La méthode du ballon sonde présente toutefois l'inconvénient de ne pas se prêter à un enregistrement continu. Un procédé analogue, mais légèrement différent, a été employé pour des vitesses de vent inférieures à deux mètres (calme) et lorsque les oiseaux, ce qui se produit assez souvent, évoluaient à moins de 40 mètres de hauteur.

On mesure les variations de la force ascensionnelle d'un ballon maintenu captif par un fil très léger, à l'aide d'un petit dynamomètre sensible au décigramme. Ce dynamomètre est formé d'un fil de caoutchouc tendu horizontalement (fig. 18) au milieu duquel vient s'attacher en a le fil maintenant le ballon.

Le point a se déplace devant une échelle graduée. L'appareil doit être fréquemment étalonné (en raison des modifications que le temps et l'usage peuvent apporter dans la tension du caoutchouc) en se servant de poids connus (0 gr. 10, 0 gr. 5, 1 gr., etc.), que l'on place en a .

Le déplacement du point a devant l'échelle graduée est alors fonction de la force ascensionnelle du ballon qui varie s'il est soumis à un vent ascendant ou descendant.

B. Étude de la composante ascendante par le procédé du cerf-volant et des banderoles.

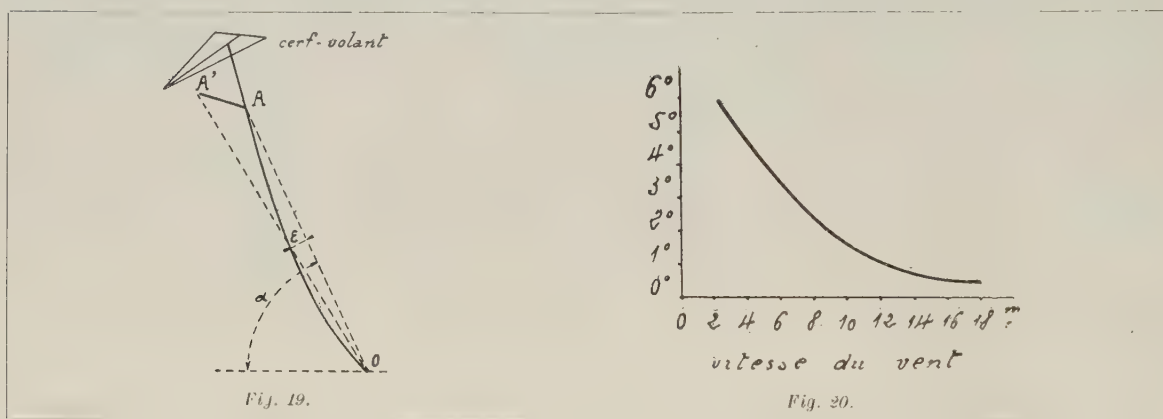
Dans le cas d'un vent de plus de 4 mètres par seconde, il y a avantage à employer une autre méthode.

A la corde d'un cerf-volant on fixe, à quelques mètres en dessous de l'appareil, en A par exemple, une banderole très légère en mousseline de soie (1), qui se place sensiblement dans la direction du vent. Si la banderole était infiniment légère, elle serait exactement en direction du vent; mais, par suite de son poids, elle fait, dans un plan vertical, un angle avec la direction du vent. Cet angle a été déterminé à la soufflerie par comparaison avec une girouette horizontale bien équilibrée et qui permettait par des expériences croisées (en la retournant bout pour bout) de déterminer la direction du courant d'air de la soufflerie. On a trouvé des valeurs qui sont traduites par la courbe de la figure 20. Des expériences faites avec différentes banderoles ont montré que, pour le modèle employé, on pouvait compter sur une valeur de ψ exacte à $0^{\circ},5$ près au maximum.

Si φ est l'inclinaison du vent sur l'horizon, comptée positivement si le vent est ascendant, on aura, en mesurant φ_1 , angle de la banderole avec l'horizon :

$$\varphi = \varphi_1 + \psi$$

Mesure de φ_1 . — On détermine au sol, (figure 20) en O, à l'extrémité de la ficelle du cerf-



volant et au moyen de la lunette de Rochon, l'angle ε sous lequel se voit la banderole A A', ou plutôt une portion de cette banderole teintée en noir et de longueur l . Si la banderole se trouve dans le plan vertical passant par A O on aura :

$$\sin (\alpha - \varphi_1) = \frac{L}{l}$$

α étant l'angle de A O avec l'horizon.

L, la distance A O déterminée facilement par la longueur de la ficelle,

ε l'angle sous lequel est vue la banderole, déterminé par la formule

$$\varepsilon = \frac{y + 5,6}{246,4}$$

à la lunette de Rochon (y en mm).

Si le cerf-volant n'est pas rigoureusement symétrique il s'incline sur le vent et A A' n'est plus dans le plan vertical de A O. Soit ω l'angle du plan A O A' avec le plan vertical; il se détermine facilement par l'angle dont il faut faire tourner la lunette de Rochon autour de son axe pour amener les deux images de la banderole à être en prolongement l'une de l'autre (un cercle divisé spécial a été ajouté à la lunette dans ce but). On a alors la formule :

$$\sin \varphi_1 = \sin \alpha \cos \theta - \cos \alpha \sin \theta \cos \omega$$

En posant

$$\sin \theta = \frac{\varepsilon L}{l}$$

qui permet de tirer φ_1 .

Précision obtenue.

Prenons $L = 100 \text{ m}$.

$l = 0 \text{ m. } 25$.

(1) Cette matière a été choisie parce qu'elle permet à la banderole de se tenir avec stabilité avec le vent.

On calcule que, α étant connu à moins d'un quart de degré près, γ pouvant s'évaluer à 0 m/m. 3 près, on doit avoir φ , exact à 1° près au maximum (1).

C'est d'ailleurs ce que confirme l'expérience. Des mesures plusieurs fois répétées, pendant un régime de vent régulier, donnent des valeurs concordantes pour φ , à moins de 1° près. La seule précaution à prendre est, dans le cas des vents irréguliers, de n'effectuer la mesure qu'au moment où la banderole reste parfaitement fixe et immobile dans le champ de la lunette.

Cerf-volant employé. — Les cerfs-volants employés sont les cerfs-volants anémomètres étudiés au Ministère des Inventions pour les besoins de l'artillerie (2) ; la vitesse du vent est donnée à la hauteur du cerf-volant par la traction du câble mesurée au moyen du dynamomètre.

Avantages de cette méthode. — Cette méthode possède sur celle du ballon sonde l'avantage d'une beaucoup plus grande rapidité. Elle permet d'explorer l'atmosphère en des points parfaitement définis, ce qui est plus difficile avec les ballons sonde qui ne passent pas toujours exactement à l'endroit désiré. Cette méthode donne la composante ascendante en un point déterminé et non pas la moyenne entre deux couches d'air voisines. Enfin on peut échelonner deux ou trois banderoles le long du cadre, et mesurer ainsi rapidement la composante ascendante à diverses hauteurs.

L'inconvénient est de ne pouvoir opérer par un vent de vitesse inférieure à 4 mètres, le cerf-volant ne se tenant pas en l'air dans ce cas. On ne peut, de plus, avec les cerfs-volants employés, dépasser 200 à 250 mètres d'altitude, alors que le ballon sonde permet d'atteindre parfois 500 mètres et plus ; on pourrait, il est vrai, remédier à ce défaut par l'emploi de cerfs-volants plus puissants mais alors moins facilement manœuvrables.

La méthode de la banderole présente encore l'inconvénient de ne pouvoir se prêter à un enregistrement continu, chaque observation nécessitant trois lectures.

Nous avons donc pensé à utiliser directement la hauteur α du cerf-volant au-dessus de l'horizon, qui, toutes choses égales d'ailleurs, est fonction de l'inclinaison φ du vent à déterminer.

La question paraît a priori assez complexe, cet angle dépendant, en dehors de φ :

I. De la nature et de la longueur de la ficelle ;

II. Du temps qui peut modifier les formes du cerf-volant (relâchement de toiles, rigidité des bambous, etc.) ;

III. De la vitesse du vent.

I. La première question peut s'éliminer en ramenant l'angle α de la figure 20 à l'angle α que fait la ficelle avec l'horizon au voisinage immédiat du cerf-volant, angle évidemment indépendant de la nature et de la longueur de la ficelle (fig. 21).

Pour cela, il faut déterminer l'angle ε , différence de ces deux angles. On y arrive facilement en plaçant deux petits corps se détachant sur le ciel (boules de coton par exemple), l'un au point

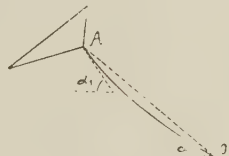


Fig. 21.

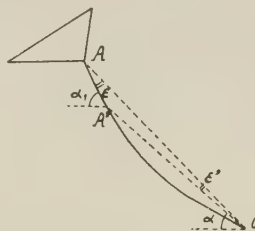


Fig. 22.

d'attache A (figure 22), l'autre en un point A' de la ficelle distant de A de 5 à 6 mètres par exemple. On détermine alors, avec la lunette de Rochon (qui donne facilement une approximation de 5''), l'angle ε' sous lequel on voit, du point O, les deux points A et A'.

On aura :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{A'O}{A A'}$$

D'où ε avec une approximation très suffisante ; on ne cherche pas en effet à calculer α à plus de 1/2° près.

On constate d'ailleurs que cet angle ε est lorsqu'il est petit, ce qui est le cas dans la pratique, assez peu variable avec la vitesse du vent et l'inclinaison du cerf-volant, pour une longueur donnée de ficelle de nature et de grosseur donnée. Ceci s'explique facilement, car une augmentation de vitesse du vent a un double effet :

(1) ψ étant d'autre part connu avec une erreur maxima de 0°5, on aura φ , inclinaison du vent, avec une erreur maxima de 1°5.

(2) Voir page 12.

1° Elle augmente la traction du cerf-volant et par suite la tension de la ficelle, donc elle tend à diminuer la courbure de cette dernière ;

2° Elle agit directement sur la ficelle en opérant sur celle-ci une pression normale qui tend à augmenter la courbure ; dans l'ordre de précision cherché ces deux effets ne compensent sensiblement dans la pratique.

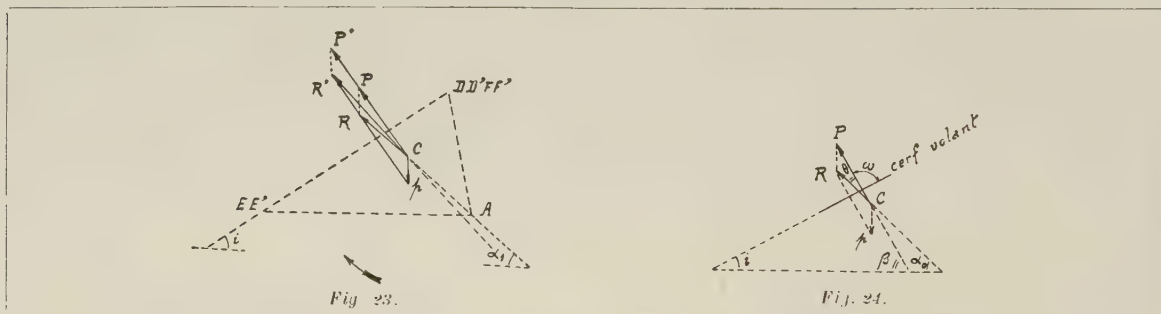
On peut conclure que les variations de α_1 seront égales aux variations de α : c'est ce qui nous intéresse pratiquement.

II° La seconde question (celle du temps qui peut modifier les formes du cerf-volant) se résout en étalonnant de temps à autre le cerf-volant par le procédé de la banderole ; on constate d'ailleurs que cette variation séculaire est très faible.

III° Reste la question de la variation de α avec la vitesse du vent. On pourrait s'en tirer en faisant simultanément un diagramme de la vitesse V du vent et de l'angle α (au moyen de l'enregistreur décrit plus loin). La fonction $\alpha = f(v)$ une fois déterminée expérimentalement par la méthode de la banderole (en désignant par α_0 la valeur de α correspondant à un vent horizontal $\varphi = 0$), on pourrait corriger les valeurs obtenues des variations de v .

C'est ainsi d'ailleurs qu'il faut opérer pour obtenir des mesures quantitatives précises.

Mais, pour simplifier la question, nous nous sommes proposé de chercher si l'on ne pouvait pas construire un cerf-volant tel que la fonction $f(v)$ se réduise à une constante dans des limites assez larges. Pour cela nous nous sommes proposé d'obtenir une fonction $\alpha_0 = f(v)$ qui soit maximum ou minimum pour les valeurs habituelles de v . Considérons le cerf-volant en équilibre (fig. 23). La résultante des forces agissant sur le point d'attache A est nulle ; donc, la tension du câble fait équilibre à la résultante CR de la résistance P du vent et du poids p du cerf-volant. Supposons que le vent vienne à fraîchir : CP augmente et sa valeur devient CP'. La résultante CR' ne passera plus par le point A et tendra à faire tourner le cerf-volant sans le sens de la flèche. L'angle i du plan D E F, D' E' F' (plan du cerf-volant) (fig. 10 et 23) avec l'horizon, tend donc à diminuer. Or, si cet angle i diminue, on peut constater, pour le cerf-volant employé, que : 1° le centre de poussée K tend à se rapprocher du bord avant DF DF' ; 2° La valeur de la résistance de l'air P diminue et, 3° son angle ω avec le plan D F E D' E' F' tend également à diminuer. Toutes choses qui tendront à ramener la résultante CR' à passer par le point A. Si ces trois quantités K, P et ω varient d'une façon convenable, on conçoit qu'il est possible que la nouvelle position d'équilibre soit telle que la nouvelle résultante CR' de P et de p ait une direction parallèle à la première et fasse encore l'angle α_1 avec l'horizon.



Par tâtonnements successifs, nous sommes arrivés en modifiant très légèrement la forme du cerf-volant anémomètre du Ministère des Inventions (type en percale) (1) à obtenir une valeur de α_1 pratiquement constante à 1°,5 près entre 7 et 16 mètres de vent.

C'est avec cet appareil que nous avons opéré lors de notre deuxième voyage pour obtenir un enregistrement continu de α .

Reste à déterminer la valeur de l'inclinaison φ du vent en fonction de l'angle α_1 du cerf-volant avec l'horizon.

On peut se laisser guider au début par une étude théorique :

Soit p le poids du cerf-volant ;

P la résistance de l'air ;

α_0 l'angle de la ficelle avec l'horizon au voisinage du cerf-volant quand l'inclinaison φ du vent est nulle, ou, ce qui revient au même, l'angle de la résultante CR avec l'horizon ;

β l'angle de P avec l'horizon.

$\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta \alpha$ ce qui devient l'angle α_0 quand φ n'est plus nul.

θ étant petit, nous avons, au second ordre près (voir fig. 24), quand $\varphi = 0$.

(1) Légère diminution de la surface des ailes.

$$\sin \theta = 0 = \frac{p \cos \alpha_0}{p}$$

$$\text{avec } \theta = \alpha_0 - \beta.$$

D'où :

$$\alpha_0 - \beta = \frac{p \cos \alpha_0}{p} \quad (1).$$

Si φ est différent de 0, l'angle α_0 devient $\alpha_0 + \Delta \alpha_0$; et P fait avec l'horizon un angle $\beta + \varphi$ (car si le cerf-volant était infiniment léger la ficelle serait en prolongement de CP et si φ venait à varier de 0 à une valeur φ , toute la figure tournerait d'un angle φ ; donc, l'angle de CP avec l'horizon deviendrait $\beta + \varphi$); la position de CP étant indépendante de p , ceci est encore vrai quand p n'est pas nul). Nous avons donc, pour la nouvelle valeur de θ , quand φ n'est pas nul :

$$\theta = \frac{p \cos (\alpha_0 + \Delta \alpha_0)}{p}$$

$$\text{avec } \theta = (\beta + \varphi) - (\alpha_0 + \Delta \alpha_0)$$

D'où :

$$-\theta = \alpha_0 + \Delta \alpha_0 - (\beta + \varphi) = -\frac{p \cos (\alpha_0 + \Delta \alpha_0)}{p} \quad (2)$$

Des relations 1 et 2 nous tirons :

$$\Delta \alpha_0 - \varphi = -\frac{p}{p} [\cos (\alpha_0 + \Delta \alpha_0) - \cos \alpha_0] = \frac{p}{p} \sin \alpha_0 \Delta \alpha_0$$

D'où :

$$\varphi = \Delta \alpha_0 (1 - \frac{p}{p} \sin \alpha_0) = K \Delta \alpha_0$$

en désignant par K le coefficient $1 - \frac{p}{p} \sin \alpha_0$

Si nous prenons, par exemple, le cerf-volant que nous avons habituellement utilisé dans notre second voyage au Sénégal, nous trouvons, pour une valeur moyenne du vent de 10 mètres :

$$P = 1 \text{ k. } 2$$

$$p = 0 \text{ k. } 25$$

$$\sin \alpha_1 = 0,75$$

Ce qui donne

$$\varphi = \Delta \alpha_1 (1 - 0,15) = \Delta \alpha_1 \times 0,85$$

$$K = 0,85$$

Nous avons, d'autre part, déterminé expérimentalement la valeur du coefficient K en partant des valeurs obtenues par la méthode de la banderole. Nous avons ainsi obtenu comme valeur moyenne d'environ 30 déterminations correspondant à un vent d'environ 10 mètres de moyenne.

$$K = 0,90$$

C'est ce nombre que nous adopterons dans la pratique.

Pour obtenir un enregistrement continu de l'angle α , nous avons construit un appareil dont les deux figures 25 et 26 donnent la reproduction photographique.

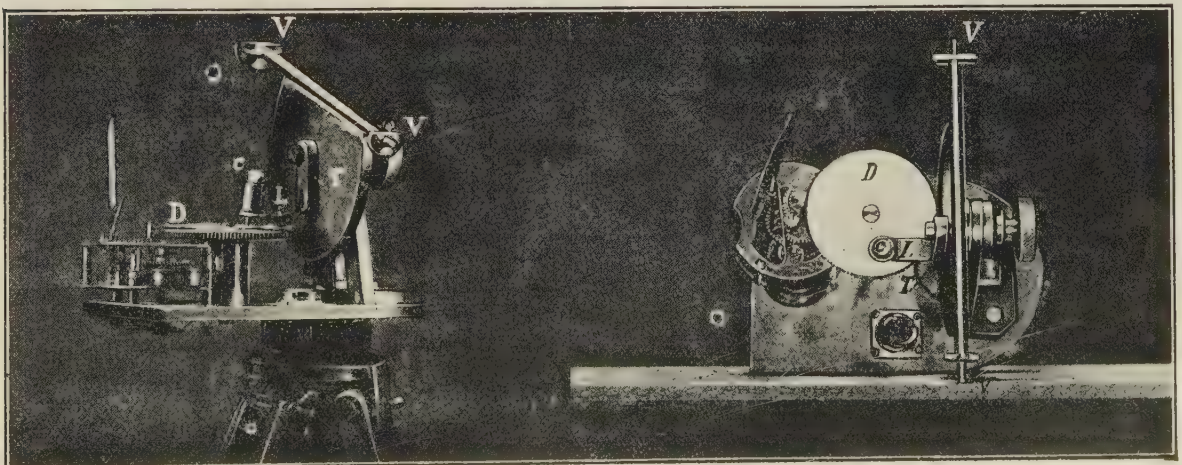


Fig. 25.

Fig. 26.

Photographies de l'enregistreur de hauteur (angle α de la droite observateur-cerf-volant avec l'horizon).

Cet enregistreur se compose essentiellement de deux cercles gradués, l'un horizontal et l'autre vertical, agencés comme les deux cercles d'un théodolite. La lunette du théodolite est remplacée ici par un simple viseur V.

Les inscriptions des angles α donnés par le cercle vertical se font sur un disque horizontal D entraîné par un mouvement d'horlogerie (fig. 25, 26 et 27). Dans ce but, le cercle vertical porte une tige P mobile à frottement dur autour de son centre et que l'on peut amener en coïncidence avec un quelconque des rayons du cercle et fixer dans cette position. Cette tige T porte une lame d'acier mince L, dont le plan est normal à l'axe de la tige T. Cette lame L est ainsi susceptible de légères flexions, seulement dans le sens de la flèche (fig. 27), c'est-à-dire dans un

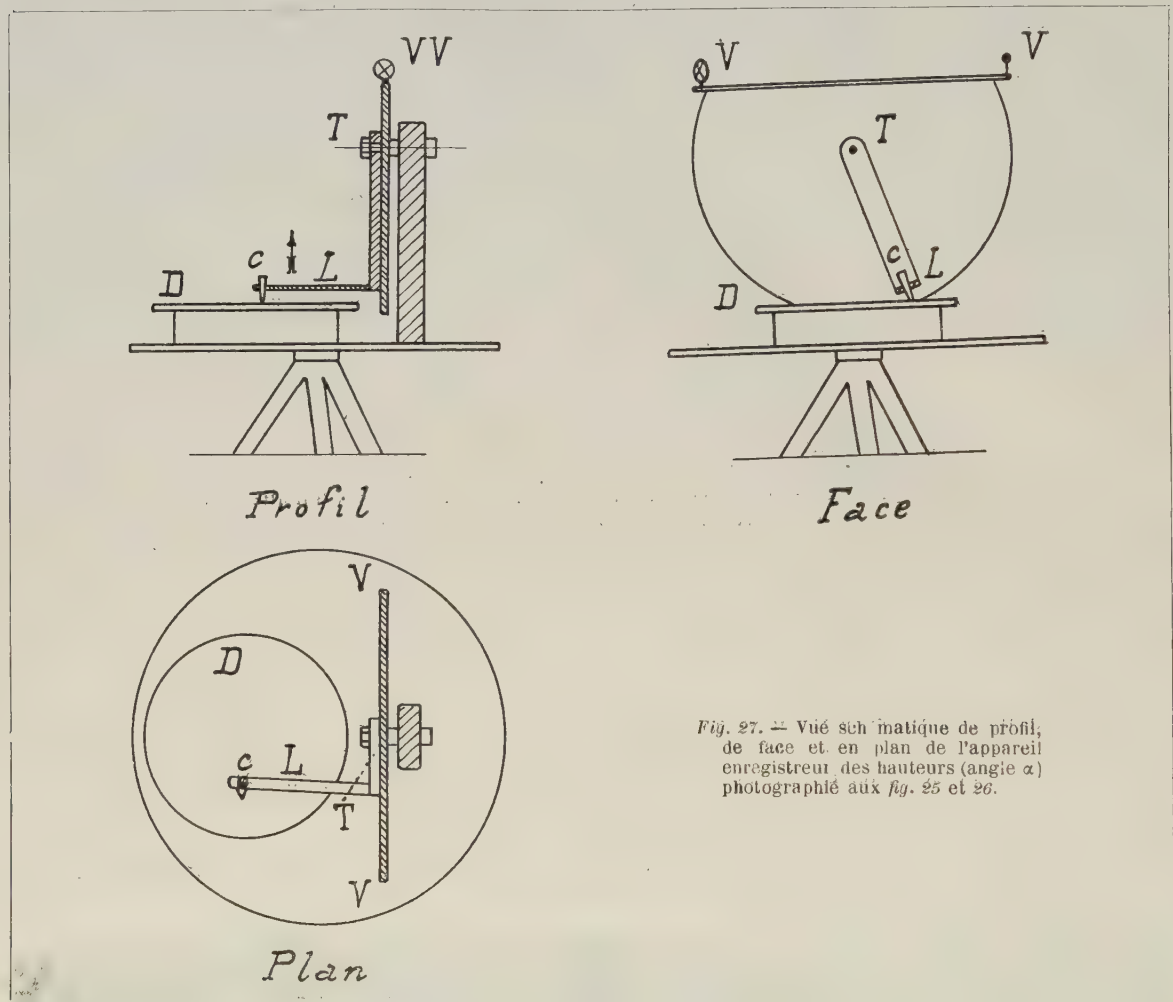


Fig. 27. — Vue schématique de profil, de face et en plan de l'appareil enregistreur des hauteurs (angle α) photographié aux fig. 25 et 26.

plan passant par le centre O du cercle. Elle porte à son extrémité un crayon inscripteur C. On règle l'appareil de telle sorte que, pour la valeur α_0 de l'angle α correspondant à $\phi = 0$, la tige T soit normale au plan du disque inscripteur D. Si donc on fait tourner le cercle vertical du théodolite, la pointe du crayon décrit une droite et les longueurs à partir du point de départ sont proportionnelles aux tangentes de $\alpha - \alpha_0$, c'est-à-dire pratiquement à $\alpha - \alpha_0$.

L'appareil est construit de telle sorte que la droite inscrite par le crayon C passe par le centre O du disque inscripteur.

Cette méthode (mesure pure et simple de α) présente sur la méthode de la banderole deux avantages considérables :

1° Elle se prête à un enregistrement continu ;

2° Si l'on veut se contenter de faire des mesures isolées, elle se réduit à un matériel extrêmement restreint : le cerf-volant avec sa ficelle, un petit dynamomètre pour avoir la vitesse du vent et un sextant de poche permettant de repérer l'angle α par rapport à un horizon artificiel (on fait ensuite la correction due à cet horizon artificiel). Tout ce matériel n'a pas besoin d'être fixé au sol, ce qui permet à l'observateur, s'il a attaché le câble du cerf-volant autour de sa ceinture de se déplacer à son gré en suivant les points où se trouvent les oiseaux, ce qui est souvent précieux.

Les appareils étant à une place fixe, il faut, en effet, parfois, attendre fort longtemps pour voir les oiseaux évoluer dans la région qu'on a choisie.

Néanmoins cette méthode est moins précise que la méthode de la banderole. Nous estimons d'après les mesures faites que l'on peut garantir l'exactitude de φ à 2° près, mais guère plus, tandis qu'avec la méthode de la banderole on peut avoir la précision du degré si les mesures sont bien faites.

CHAPITRE III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX OBTENUS CAUSE DIRECTE & INDIRECTE DU VOL A VOILE SOURCE PRIMITIVE D'ÉNERGIE QUALITÉS VOILIÈRES DES DIFFÉRENTES ESPÈCES

REGIONS EXPLOREES

Les expériences que nous avons effectuées ont porté d'abord sur les goélands que l'on voit assez fréquemment voler à voile, soit à l'arrière des navires, soit au voisinage des côtes. Nous avons opéré à terre, sur la côte de Normandie, et en mer, dans la Manche d'abord et dans la mer du Nord ensuite.

En ce qui concerne les grands voiliers : milans et vautours que l'on ne rencontre d'une manière un peu constante qu'en Afrique, nous avons fait, dans le but de les étudier, quatre voyages successifs :

Le premier dans le Sud-Algérien et particulièrement dans la province de Constantine, au printemps de 1919 ;

Le second au Sénégal, dans la Guinée Française (région du Fouta Djallon) et dans le Soudan Français (plaine du Haut-Niger) pendant l'automne 1919 ;

Le troisième au printemps 1921, au Sénégal, dans les environs de Dakar.

Le quatrième en automne 1921 en Côte d'Ivoire et au Sénégal.

CAUSE DIRECTE DU VOL A VOILE

Dans le cas des goélands qui volent sur nos côtes ou qui suivent les navires, il y a une composante ascendante du vent très nette. A l'arrière des navires, elle était en général très forte (2 mètres par seconde) ; sur les côtes, elle était également assez forte (supérieure à 1 mètre par seconde).

Dans ce dernier cas, cette ascendance du vent est provoquée par la présence de falaises ou de dénivellations du terrain. A l'arrière des navires en marche elle est due à la rencontre des masses d'air séparées par la coque et la superstructure du navire, au moment du passage du bateau. Ces masses d'air se rencontrant avec une certaine vitesse relative et ne pouvant s'échapper par le bas, créent une vague d'air ascendant qui suit le bateau. C'est également ce qui se produit à l'arrière d'une automobile en marche : le courant ascendant soulève le nuage de poussière qui la suit.

Les indigènes de la Côte d'Ivoire utilisent très ingénieusement sur l'eau un phénomène analogue. Avec leurs petites pirogues, ils suivent parfois une heure entière sans donner un coup de pagaie le bateau à vapeur qui fait le service de la lagune. Pour cela, ils s'efforcent au début de donner en pagayant à leur pirogue la vitesse du bateau, puis se placent sur la partie avant d'une des vagues du train d'ondes qui suit le sillage du navire. Après cela, ils n'ont plus qu'à gouverner, se trouvant sur un plan incliné liquide qui suit le bateau, ce qui leur permet d'obtenir sans effort une vitesse de 7 à 8 nœuds.

De même les oiseaux se placent sur la partie ascendante de la vague d'air qui suit le navire.

Mais il ne semblait plus en être de même dans le cas des grands voiliers africains, objets des célèbres observations de Mouillard. C'est, du moins, l'impression que nous avons eue, lorsqu'en débarquant à Dakar en 1919, nous eûmes l'occasion d'observer dans les plaines tout unies qui avoisinent cette ville, des centaines de voiliers qui, à première vue, paraissaient évoluer à leur gré, irrégulièrement, dans tout l'espace. C'est alors que nous commençâmes les expériences

décrites plus haut pour étudier l'énergie interne **cinétique** du vent. Ces expériences nous ont amené, en 1919, aux conclusions suivantes :

1° Le vent a, dans ces régions, presque toujours une composante verticale, et, si l'on faisait un diagramme de la composante verticale du vent dans un plan horizontal à une certaine hauteur au-dessus du sol, on constaterait l'existence de **plages positives** (composante ascendante) et de **plages négatives** (composante descendante), les unes restant fixes (quand elles sont dues à des

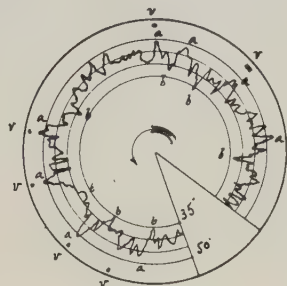


Fig. 28.

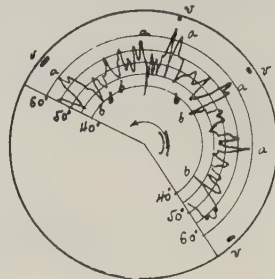


Fig. 29.

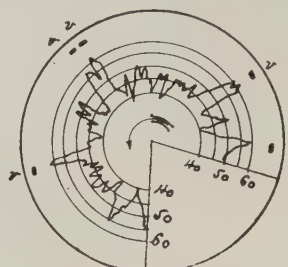


Fig. 30.

Fig. 28, 29 et 30 — **Diagrammes d'angle α** . — Les traits épais *v* indiquent que des oiseaux volaient à voile *a* ce moment au voisinage immédiat du cerf-volant. Un tour du disque enregistreur correspond à 25 minutes environ.

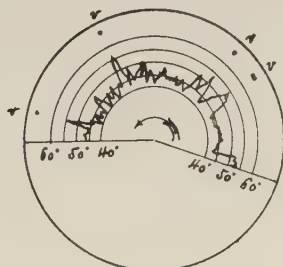


Fig. 31. — Angle α ,

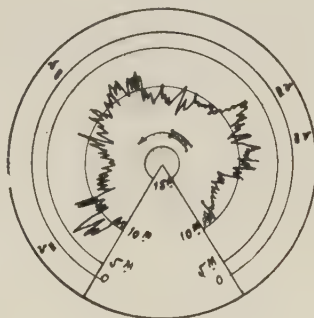


Fig. 32. — Vitesse du vent.

Fig. 31 et 32. — **Diagrammes simultanés d'angle α et de vitesse du vent** pris le 13 mars 1921 de 16 h. 5 à 16 h. 20. Les traits épais *v* ont la même signification que dans les figures ci-dessus.

Fig. 33 et 34. — **Diagrammes simultanés de vitesse du vent et d'angle α** . — *v*, vol à voile autour du cerf-volant.

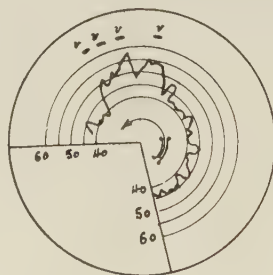


Fig. 33.

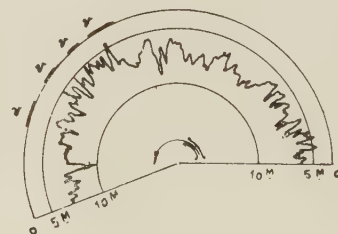


Fig. 34.

obstacles naturels, ce qui est rare), et les autres **se déplaçant sans loi apparente** et dues à des causes encore indéterminées ;

2° Les zones où les oiseaux évoluent sans battre des ailes et sans perdre de hauteur **ont toujours coïncidé avec les plages de composantes ascendantes**. C'est dans ces zones qu'ils se maintenaient en décrivant, soit des orbes, soit des lignes brisées. Ils se déplaçaient avec elles et n'allaient de l'une à l'autre qu'en ligne à peu près droite et sans s'arrêter. Ils pouvaient alors perdre impunément un peu de hauteur qu'ils rattrapaient dans la zone positive suivante ; ce qui, à première vue, donne l'impression qu'ils évoluent à voile irrégulièrement dans l'espace ;

3° Aucune liaison n'a pu être établie entre les irrégularités du vent et le vol à voile qui se produit souvent par vent faible et régulier.

Les diagrammes de hauteur du cerf-volant au-dessus de l'horizon (angle α) obtenus au cours de notre deuxième voyage, en 1921, rendent très bien compte des conclusions que nous venons d'exposer (voir fig. 28, 29, 30, 31 et 33). On observe parfaitement sur ces diagrammes (1) les passages de plages à composante ascendante comme en *a a a* et à composante descendante comme en *b b b*. Un point épais marqué à la périphérie du cercle d'inscription indique les moments où les oiseaux volaient à voile au voisinage immédiat du cerf-volant comme en *v, v* ; on constate que toujours, **sans exception**, les oiseaux se trouvaient, dans ce cas, dans une plage à composante ascendante.

Des théories exposées dans le premier chapitre, c'est donc la théorie des courants ascendants qui est vérifiée par nos expériences, dans le cas des voiliers étudiés jusqu'ici,

On avait objecté à cette théorie le fait que l'on voyait des oiseaux voler à voile en tous points de l'espace et qu'il était, par conséquent, impossible que l'air montât partout en même temps. C'est d'ailleurs l'impression que l'on éprouve au premier abord quand on a sous les yeux le spectacle imposant de plusieurs centaines de voiliers évoluant en même temps dans l'espace. Mais une observation plus attentive montre que la distribution des oiseaux n'est jamais régulière d'un bout à l'autre de l'horizon. La **densité** d'oiseaux varie dans l'espace et dans le temps. On constate que, dans les zones à **composante ascendante**, il y a une **grande densité d'oiseaux** ; dans celles à **composante descendante**, au contraire, il y en a peu et particulièrement, ils **n'y décrivent jamais de cercles**.

Nous avons été à même de constater ce fait plus de cent fois. Partout et toujours, quand les oiseaux volaient en grand nombre ou décrivaient des cercles, le vent avait une composante ascendante, même si, ce qui arrive parfois, la composante horizontale est nulle ou presque nulle. Au contraire, dans les zones où l'air ne monte pas (ou descend), les oiseaux, très peu nombreux, ne faisaient que passer, et chaque fois que nous avons été à même de constater des variations de hauteur, ils en perdaient.

Le vol en orbes est toujours le signe de la présence d'une zone ascendante, son explication est donc fort simple : le seul but de l'orbe est, pour l'oiseau, de rester dans cette zone favorable, tout en conservant une vitesse horizontale suffisante pour sa sustentation.

Lorsque le vent fraîchit, on voit souvent le vol en orbes disparaître pour faire place à un vol en ligne droite ou brisée, et même parfois au vol sur place.

Lorsqu'un oiseau veut aller d'un point à un autre, il arrange son trajet de manière à rester longtemps dans les zones à composante ascendante et moins dans les autres : nous avons vu fréquemment des oiseaux décrire plusieurs orbes dans une colonne ascendante, puis se laisser glisser en vol plané jusqu'à la zone ascendante suivante et ainsi de suite. Ils peuvent aussi, tout en volant en ligne droite, profiter de la forme des zones ascendantes, qui sont assez souvent allongées dans le sens du vent.

Les oiseaux doivent donc vraisemblablement posséder un sens spécial leur permettant de sentir, non seulement si l'air « porte », mais même de quel côté se trouve ou se déplace la zone « portante ». Mouillard l'avait déjà remarqué : il dit, en parlant des courants ascendants qui se forment parfois sur les flancs d'une carrière voisine du Caire :

« L'oiseau sait deviner ces courants, cela se voit, il a la **prescience** des mouvements de l'air » (2).

Ce phénomène est d'ailleurs très net avec les appareils dont nous disposions : chaque fois que notre cerf-volant indiquait la naissance ou le passage d'un courant ascendant bien marqué, on voyait les oiseaux du voisinage (s'il y en avait) s'y précipiter pour se disperser ensuite quand le phénomène cessait.

Quel peut être l'organe correspondant à ce sens spécial des mouvements de l'air ? On sait que les oiseaux possèdent dans la région des poumons et dans celle du cerveau des organes spéciaux appelés « sacs aériens ». Les sacs pulmonaires sont sans doute en relation avec les phénomènes respiratoires ; mais la fonction des sacs cervicaux ne paraît pas définie : peut-être jouent-ils un rôle analogue à celui des statoscopes employés en ballon et décèlent-ils à l'oiseau de très faibles variations de densité de l'air, lui permettant ainsi de se diriger dans le dédale des courants aériens.

CAUSE INDIRECTE DU VOL A VOILE

Au retour de notre premier voyage au Sénégal et en Guinée, nous nous sommes proposé de rechercher quelle pouvait être l'origine de ces zones ascendantes et descendantes auxquelles nous assignions des causes indéterminées.

Il nous a semblé logique d'en rechercher l'origine dans des inégalités de densité de l'atmosphère : ces zones seraient dues à des courants de convection de l'atmosphère.

Nous avons, pour tenter d'éclaircir la question, entrepris au laboratoire une série de recher-

(1) Les diagrammes originaux obtenus avec un crayon très fin présentent de très grandes difficultés de reproduction à la gravure, ce qui explique les imperfections des exemplaires présentés ici, qui, toutefois, concourent, dans leur allure générale, avec les originaux.

(2) MOUILLARD. *Le vol sans battements*, p. 264.

phes sur les courants de convection d'une couche d'air en mouvement relatif par rapport à deux couches, l'une inférieure à température plus élevée, l'autre supérieure à une température plus basse.

Pour cela, au moyen d'un ventilateur convenablement réglé, on produisait un courant horizontal entre deux plaques métalliques, dont l'une, inférieure, P, était maintenue à température élevée au moyen d'un bain de sable convenablement chauffé et dont l'autre, P', était en contact avec une couche d'eau froide (voir fig. 35).

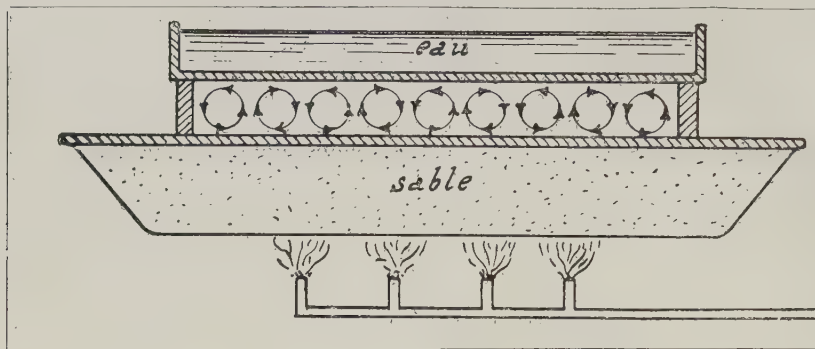


Fig. 35. — La direction du courant d'air est perpendiculaire au plan de la figure. Les flèches indiquent le sens de rotation des tourbillons.

Dans ces conditions, lorsque la température est uniformément répartie sur les deux plaques et si le courant d'air est régulier, on observe (par exemple en rendant les filets d'air visibles au moyen d'une fumée légère) la formation de tourbillons à axes horizontaux, ces axes étant des droites parallèles à la vitesse relative du courant d'air par rapport aux couches adjacentes (ou à la vitesse moyenne relative si les couches supérieure et inférieure n'ont pas les mêmes vitesses). Le sens de rotation est alternativement dextrorsum ou sinistrorsum, comme dans une série de cylindres engrenant les uns avec les autres par une de leurs génératrices.

Si, au contraire, la température n'est pas uniformément répartie et si le courant d'air n'est pas régulier (et surtout si sa vitesse est faible), les tourbillons se déplacent et se déforment irrégulièrement. C'est évidemment, en général, le cas dans les couches basses de l'atmosphère, au voisinage du sol et ceci rend compte de ces déplacements irréguliers signalés dans la plupart des cas.

Il semblait donc possible que nous ayons eu affaire en Afrique à des cas de courants de convection atmosphériques analogues à ceux obtenus au laboratoire.

Toutefois, ce n'était là qu'une présomption. Aussi nous sommes-nous proposé, lors de notre dernier voyage, de rechercher directement, au moyen des appareils décrits au début de cet ouvrage si des différences de densité atmosphérique (température ou pression) pouvaient expliquer le phénomène des plages ascendantes et descendantes.

Dans ce but, nous suivions simultanément la marche du galvanomètre relié à un des appareils indicateurs de température ou de pression et les variations de hauteur du cerf-volant, c'est-à-dire l'inclinaison du vent sur l'horizon.

En ce qui concerne les variations de température, on constate que, quand le vent reste horizontal, les variations du galvanomètre sont très faibles : lorsqu'au contraire, il y a des plages à composante ascendante et descendante, les déviations du galvanomètre deviennent beaucoup plus sensibles. En particulier, au moment du passage d'une zone à composante ascendante (indiquée par la montée du cerf-volant), on constate presque toujours (cinq fois sur six environ), une augmentation de température quelques secondes avant la montée du cerf-volant, puis une diminution de température au moment de la descente du cerf-volant.

Les exceptions à cette règle peuvent être dues à des remous secondaires de l'atmosphère et dans ce cas, d'ailleurs, nous avons presque toujours, sauf une fois ou deux, constaté des variations rapides de température, aux environs du passage de la zone ascendante.

A titre d'exemple, nous transcrivons ici cet extrait de notre cahier de notes :

« 17 mars, 10 heures du matin. — Le cerf-volant se maintient avec un angle moyen d'environ 34°, le galvanomètre n'indique que de légères variations entre 205 et 209 petites divisions de la règle (millimètres). Pas d'oiseaux dans le voisinage immédiat du cerf-volant.

« Au bout de quelques minutes, le galvanomètre monte en quelques secondes à 225 divisions (augmentation de température d'environ 0°,9, chaque division correspondant à 0°,05). Aussitôt après, le cerf-volant remonte à 45° d'angle, où il se maintient avec 215 divisions au galvanomètre : vol à voile de nombreux ciseaux au voisinage immédiat du cerf-volant. Puis le galvanomètre passe à 206 divisions : le cerf-volant redescend et en même temps les oiseaux s'éloignent. »

Nous avons, d'après des relevés effectués simultanément, reporté sous forme de courbes (1)

(1) Il eût été évidemment préférable et plus simple d'avoir un galvanomètre enregistreur. Mais cet appareil a l'inconvénient d'être à la fois fragile, lourd et encombrant, et il a fallu y renoncer pour nos expéditions en Afrique.

une partie des observations du courant des journées du 16 et du 17 mars 1921 (voir fig. 36 et 37).

On constate particulièrement dans la deuxième figure, la netteté du phénomène de l'élévation de température précédant immédiatement l'arrivée de l'onde ascendante souvent accompagnée d'un groupe d'oiseaux évoluant à voile (*v v*).

Il s'agit donc bien, en Afrique, de courants de convection atmosphérique, de remous de chaleur, pour employer une expression plus courante (1).

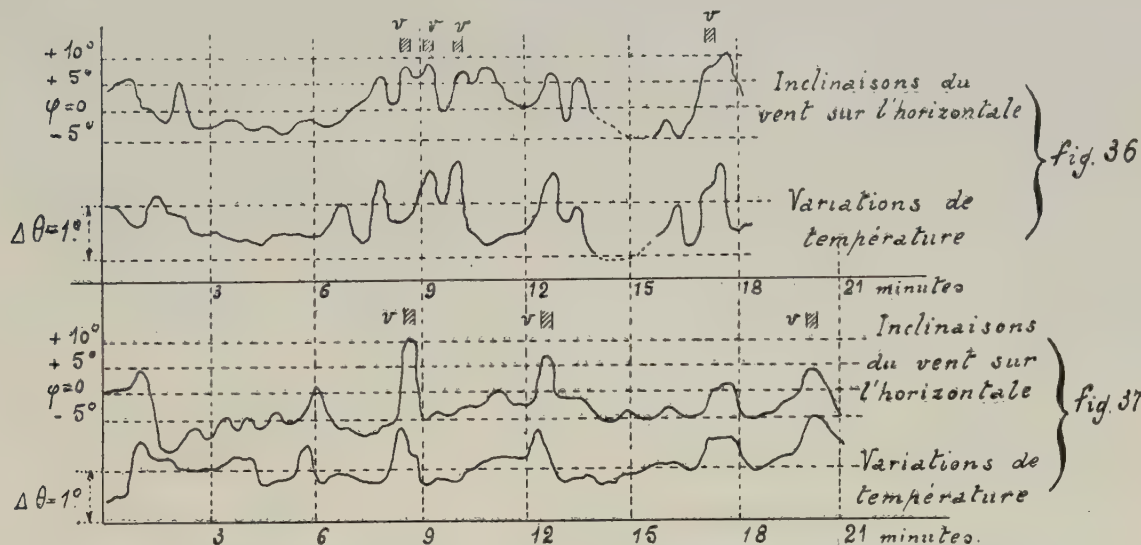
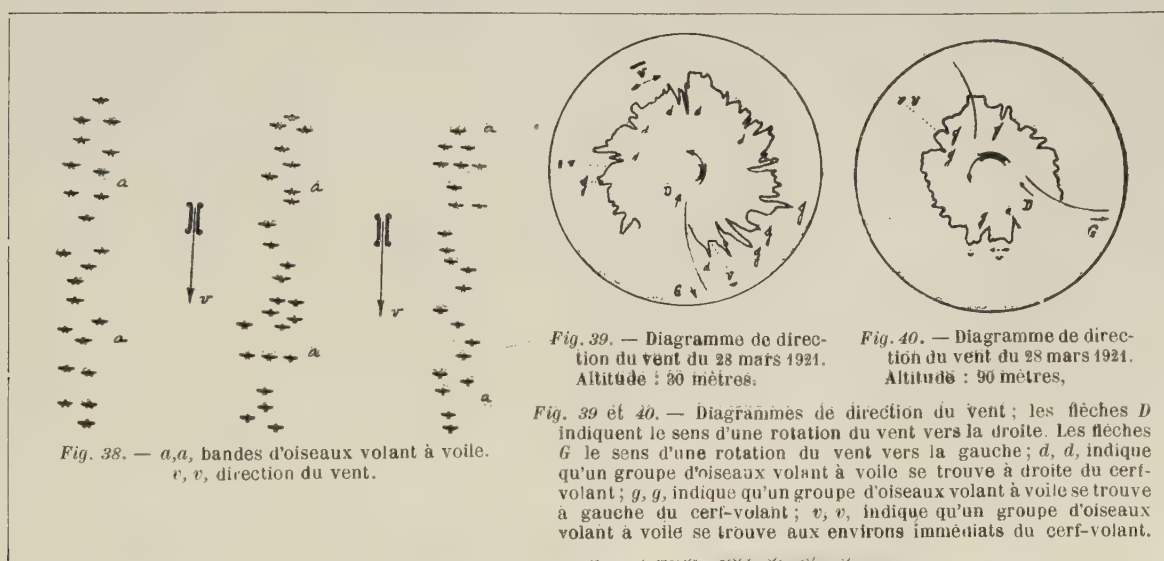


Fig. 36 et 37. — Courbes donnant simultanément les variations de température et les variations d'inclinaison du vent. (Hachures au-dessus de la courbe en *v, v*, = oiseaux volant à voile au voisinage immédiat des appareils).

Il est à remarquer, d'ailleurs, qu'au cours de notre voyage de 1921, nous avons eu par trois fois, le matin et par vent moyen assez fort, l'occasion de voir ces plages ascendantes (généralement irrégulièrement distribuées) affecter la forme de bandes parallèles à la direction du vent. Elles étaient jalonnées par les oiseaux qui volaient par centaines, groupés en bandes parallèles distantes de deux ou trois cents mètres et s'étendant d'un bout à l'autre de l'horizon (fig. 38).



Ces bandes, toutefois, se déplaçaient irrégulièrement perpendiculairement à leur direction commune, ainsi qu'on l'observe souvent pour les tourbillons obtenus au laboratoire lorsque l'on écarte suffisamment les cloisons latérales pour qu'ils puissent se mouvoir perpendiculairement à leur axe.

(1) Ce phénomène se produisait, même les jours où l'on n'apercevait pas les tremblements des objets éloignés, les « heat eddies » de Hankin,

Remarquons aussi que, si dans les zones mêmes du courant ascendant, la direction du vent est à peu près fixe, il y a généralement au voisinage de ces zones de légères variations de direction du vent qui semblent bien du sens prévu pour la formation d'un courant ascendant. Nous avons, en effet, constaté plusieurs fois qu'en dessous de la zone d'évolution des oiseaux, le vent tendait à converger dans cette zone, tandis qu'à son niveau et au-dessus il tendait souvent à diverger : c'est bien le sens qu'indiquent les flèches de la figure 35 dans la formation de tourbillons à axe horizontaux (1).

Nous reproduisons à cet effet deux diagrammes de direction du vent (fig. 39 et 40), pris au moyen de l'enregistreur déjà décrit. Le premier a été pris à environ 30 mètres d'altitude au-dessous de la zone d'évolution des oiseaux et le second à 90 mètres environ, au milieu ou légèrement au-dessus de ladite zone (2).

Ce phénomène est loin d'avoir la netteté de celui des variations de température, mais il s'est produit assez souvent pour mériter d'être signalé.

Notons enfin que les variations de température au passage des zones ascendantes étaient de l'ordre de $0^{\circ},5$ à $1^{\circ},5$. Nous avons trouvé comme moyenne de 27 mesures une valeur de $0^{\circ},9$ (la composante ascendante du vent correspondant à cette moyenne était de l'ordre de 1 mètre par seconde).

Les variations de pression, ainsi que nous l'exposons au début, paraissent insignifiantes (inférieures au $1/10^{\text{e}}$ de mm de mercure, limite de notre précision) en regard des variations de température. Une variation de température de 1° correspond, en effet, au point de vue de la variation de densité de l'air à une variation de 3 mm de mercure environ.

La chose était d'ailleurs à prévoir, les différences de densité intervenant seules dans les phénomènes décrits : on sait, en effet, que si deux masses d'air à température et à pression différentes sont mises en communication, l'équilibre de pression s'établit immédiatement, tandis que l'équilibre de température peut durer longtemps à se produire, en raison de la mauvaise conductibilité calorifique des gaz.

Il n'est, d'ailleurs, pas surprenant que des différences de température de l'ordre du degré et même moins, provoquent des courants de convection de l'ordre de 1 mètre par seconde. On calcule, en effet, qu'une masse d'air sphérique de 20 mètres de diamètre présentant une température de $1/2$ degré supérieure au milieu ambiant tendrait à s'élever avec une vitesse de 1 mètre par seconde environ.

Il serait intéressant de se rendre compte si des courants de convection de même nature se produisent dans les hautes couches de l'atmosphère (3). Le problème paraît plus difficile à résoudre, mais la question pourrait s'envisager en emportant en avion ou en dirigeable un thermomètre à spirale de platine analogue à celui employé par nous : il faudrait toutefois remplacer le galvanomètre employé par un milliampèremètre très sensible monté à la cardan.

Il semble, en tout cas, bien probable, que si de semblables courants de convection existent, l'on doit retrouver dans les hautes régions de l'atmosphère qui sont moins troublées que les basses, les tourbillons régulièrement alignés que l'on observe au laboratoire. Or, on sait que les cirrus se présentent fréquemment sous l'aspect de bandes régulièrement espacées comme les vagues de la mer. Ils pourraient, semble-t-il, n'être que la partie supérieure de semblables tourbillons rendus visibles par la condensation de la vapeur d'eau, condensation due à la diminution de pression. Or, une autre théorie a été souvent mise en avant pour expliquer cette forme de nuages : c'est la théorie des vagues atmosphériques qui, d'après les travaux d'Helmholtz, peuvent se produire dans certaines circonstances.

Remarquons, pour décider entre les deux théories, que, dans le premier cas (tourbillons de convection), la direction des bandes doit être parallèle à celle de la vitesse relative des couches d'air en contact (autrement dit au gradient vertical du vent) ; dans le deuxième cas, au contraire (vagues atmosphériques), elle doit être perpendiculaire.

Or, M. Besson (4) a comparé la direction des bandes de cirrus avec leur vitesse par rapport au sol. Il a, sur 240 cas, calculé la fréquence en pourcentage de 30° en 30° des différentes valeurs de l'angle α de la direction des bandes de cirrus avec celle de leur vitesse relative au sol (5).

(1) Il est à remarquer que, dans les zones à composante ascendante, le vent est, en général (quoique pas toujours), un peu plus faible que dans les régions avoisinantes.

(2) On voit que dans le premier le vent tend à tourner du côté où se trouvent les oiseaux qui occupent la place de la zone ascendante. Dans le second au contraire qui est pris à une altitude plus élevée, le phénomène tend à s'inverser.

(3) Nous avons pensé étudier dans ce but les mouvements de montée et de descente des sommets des cumulus. Nous avons d'ailleurs constaté, par des mesures trigonométriques faites sur les sommets des cumulus, que ceux-ci avaient fréquemment des mouvements verticaux dépassant 1 mètre par seconde. Mais il n'est pas certain que la vitesse ascendante ou descendante de l'air soit égale à la vitesse ascendante ou descendante du sommet du nuage.

(4) Besson : « Sur les alignements de nuages » (Ann. de la Soc. mét. de France, avril 1909).

(5) Les nombres donnés pour α s'étendant à un espace de 15° de part et d'autre de leur valeur moyenne. Ainsi 60° signifie de 45° à 75° .

Il a trouvé les nombres suivants :

Valeurs de α	0	30°	60°	90°
Fréquences correspondantes.....	26	43	21	10

D'un autre côté, d'après 250 observations de sondages à deux théodolites relatives à une altitude comprise entre 7.000 mètres et 9.500 mètres (altitude des cirrus), j'ai fait le même travail que M. Besson en ce qui concerne l'angle β du gradient vertical de la vitesse du vent par rapport au sol.

Or, en nous reportant aux nombres de M. Besson, si nous avons affaire, dans le cas des cirrus, à des vagues atmosphériques, nous devrions trouver pour β les fréquences suivantes (gradient perpendiculaire à la direction des bandes) :

Valeur de β	0	30°	60°	90°
Fréquences correspondantes.....	10	21	43	26

Si, au contraire, nous avons affaire à des courants de convection, nous devrions trouver (gradient parallèle à la direction des bandes) :

Valeur de β	0	30°	60°	90°
Fréquences correspondantes.....	26	43	21	10

Or, le résultat de notre relevé a donné :

Valeur de β	0	30°	60°	90°
Fréquences correspondantes.....	23	40	27	10

Ces valeurs, étant donné surtout le petit nombre des observations de M. Besson et des nôtres, paraissent bien favoriser la théorie des courants de convection.

SOURCE PRIMITIVE D'ENERGIE

Nous pouvons conclure de cette étude que, dans tous les cas de vol à voile que nous avons étudiés, les oiseaux utilisent une composante ascendante du vent. La source primitive d'énergie à laquelle ils font appel par l'intermédiaire de cette composante ascendante est l'énergie cinétique de l'air dans le cas des goélands volant à voile le long des falaises, l'énergie thermique de la chaudière dans le cas des goélands suivant les navires en mer (puisque c'est elle qui, en déterminant la propulsion du navire est cause de la formation d'une colonne d'air ascendante); enfin l'énergie thermique de l'air dans le cas le plus remarquable, celui des grands voiliers africains.

Dans ce dernier cas, ce n'est pas nécessairement (quoique certainement très **fréquemment**) le soleil qui agit **directement** sur les couches d'air pour produire, en un endroit donné, des différences de température. Même par temps couvert dans nos régions, et même de nuit, il y a certains vents présentant des variations de température du même ordre de grandeur que celles observées en Afrique, ainsi que nous avons pu le contrôler à l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr (1). Il est d'ailleurs bien probable que, dans ce cas encore, c'est tout de même le soleil qui est, au moins indirectement, la cause de ces variations de température. C'est donc lui qu'il faut, du moins en général, considérer comme la véritable source à laquelle l'oiseau emprunte l'énergie nécessaire à sa sustentation (2).

QUALITES VOILIERES DES DIVERSES ESPECES D'OISEAUX

L'oiseau utilisant un vent ayant une composante ascendante, se comporte donc comme un planeur descendant par rapport à l'air d'une quantité égale par seconde à la valeur de la composante ascendante de la vitesse du vent ; il doit en conséquence être construit de manière à avoir le meilleur angle de glissement possible γ et le meilleur Ky possible (Ky de la notation Eiffel, poussée = $Ky SV^2$).

Il était donc intéressant de chercher à déterminer ces quantités, ce qui revient en somme, à évaluer la traînée et la poussée de l'oiseau pendant le vol.

Or, étant donné les conditions du vol de l'oiseau, si v est la composante verticale minimum nécessaire à la sustentation et V la vitesse horizontale relative de l'oiseau par rapport à l'air, on démontre facilement que :

$$\frac{v}{V} = \gamma = \frac{\text{Traînée}}{\text{Poussée}} = \frac{Kx}{Ky}$$

Avec : Traînée $T = Kx SV^2$

Poussée $P = Ky SV^2$

S , étant la surface portante de l'oiseau.

(1) Mais en général, c'est quand il y a du soleil, au moins par intervalles, qu'on observe le plus ces variations de température.

(2) Hankin a d'ailleurs observé que le vol à voile était souvent en relation avec la variation d'insolation. (Voir *Animal Flight*, p. 90 et suivantes.)

Or, la poussée P est égale, dans le cas du mouvement considéré (qui est uniforme), au poids P de l'oiseau. Il faudra donc déterminer v , V, S et P.

P et S se déterminent par des mensurations sur les oiseaux morts.

La vitesse minimum v de descente par rapport à l'air peut s'étudier dans les cas suivants :

1° Quand l'oiseau reste immobile en observation et comme suspendu en l'air (comme cela se produit souvent au-dessus d'un obstacle) ; dans ce cas on démontre facilement que l'inclinaison du vent sur l'horizontale est supérieure ou au moins égale à l'angle de glissement minimum de l'oiseau (1) ; on a donc une limite supérieure de cette valeur.

2° Quand l'oiseau décrit des orbes pour s'élever dans une zone à composante ascendante. Si on détermine sa vitesse ascensionnelle et celle du courant ascendant, la différence donnera la vitesse de chute dans l'air qui doit correspondre au minimum, l'oiseau qui désire monter ayant avantage à le faire avec un minimum de travail.

3° Une limite inférieure à la vitesse de descente minimum est donnée dans le cas où l'oiseau se maintient à hauteur constante dans une zone à composante ascendante en battant les ailes de temps à autre, ce qui montre que le courant ascendant est insuffisant à le maintenir.

La vitesse horizontale V de l'oiseau est obtenue par différence de la vitesse du vent (à l'endroit où il vole), et de la vitesse de l'oiseau par rapport au sol.

La vitesse de l'oiseau par rapport au sol ainsi que sa hauteur, sa distance, le diamètre des orbes décrits sont déterminés par des mesures d'angle, soit au théodolithe avec une lunette Rochon, soit à la jumelle micrométrique, soit parfois même simplement à la règlette d'artillerie qui, pour des angles de plusieurs degrés donne une précision suffisante (2). La base employée pour la détermination des distances de l'oiseau est l'envergure de l'oiseau lui-même, quantité qui varie fort peu ainsi que nous allons le voir. D'après les renseignements recueillis au Muséum, les oiseaux atteignent, en effet, au bout de très peu de temps leur taille normale (et même leur poids normal). Pour les goélands, par exemple, qui peuvent vivre dix ans et même plus, la taille normale est atteinte au bout de deux ou trois mois, et les oiseaux jeunes se reconnaissent à leur plumage. On constate que les nombres que l'on obtient pour mesure de l'envergure, varient peu d'un oiseau à l'autre. C'est ainsi par exemple que les mesures faites sur 31 sujets du type des goélands bleus choisis au hasard, ont donné, comme valeur moyenne d'envergure, 1 m. 325. L'erreur probable, en prenant pour un oiseau quelconque 1 m. 325 d'envergure a été calculé par la méthode habituelle : on a trouvé 5 % 3, c'est-à-dire environ 4 % ; l'écart maximum observé dans les mesures faites a été, et une seule fois, de 19 centimètres, c'est-à-dire environ 14 %. On peut donc compter sur une erreur probable de 5 % au plus et une erreur maximum de 15 % à titre exceptionnel. L'erreur probable sera encore réduite de moitié si les mesures portent non pas sur un seul animal, mais sur deux, ce qui est assez facile, les oiseaux, en général, ne se déplaçant pas isolément.

Il serait évidemment plus précis de se servir pour les mesures des vitesses horizontales d'un appareil télécinématographique tel que l'intervalle entre deux poses soit rigoureusement connu. Mais l'inconvénient d'encombrement et de prix d'un tel appareil le fait écarter, et les mesures faites par la méthode précédemment indiquée permettant d'obtenir une précision suffisante, surtout lorsqu'elles sont faites en assez grand nombre, les erreurs étant accidentelles.

Nous avons ainsi obtenu les résultats suivants (3).

Milan	V = 7 m.	$v = 0$ m. 43	$\gamma = 1/16$	Kx = 0,07	Ky = 0,004
Pernoptère moine	V = 8 m. 4	$v = 0$ m. 50	$\gamma = 1/16$	Kx = 0,08	Ky = 0,005
Pseudogyps africanus	V = 9 m. 2	$v = 0$ m. 55	$\gamma = 1/17$	Kx = 0,11	Ky = 0,007
Gyps fulvus	V = 10 m. 5	$v = 0$ m. 68	$\gamma = 1/15,5$	Kx = 0,09	Ky = 0,006

Ce qui frappe toutefois au premier examen de ces nombres, c'est la grandeur de la quantité Ky, et la faiblesse du rapport $= \frac{Kx}{Ky}$. C'est le contraire de qui se passe pour les modèles de planeurs étudiés jusqu'à ce jour, pour lesquels, quand le rapport $\frac{Kx}{Ky}$ est très faible, la quantité Ky, est faible également. (La résistance du corps de l'oiseau étant comprise dans Kx.)

(1) Sans cela l'oiseau ou bien serait emporté par le vent au-dessus de l'obstacle ou bien serait obligé de descendre. (Voir LANCHESTER : *Aérodynamique*, chap. IX, p. 291.)

(2) On peut aussi dans certains cas mesurer la vitesse de l'ombre de l'oiseau.

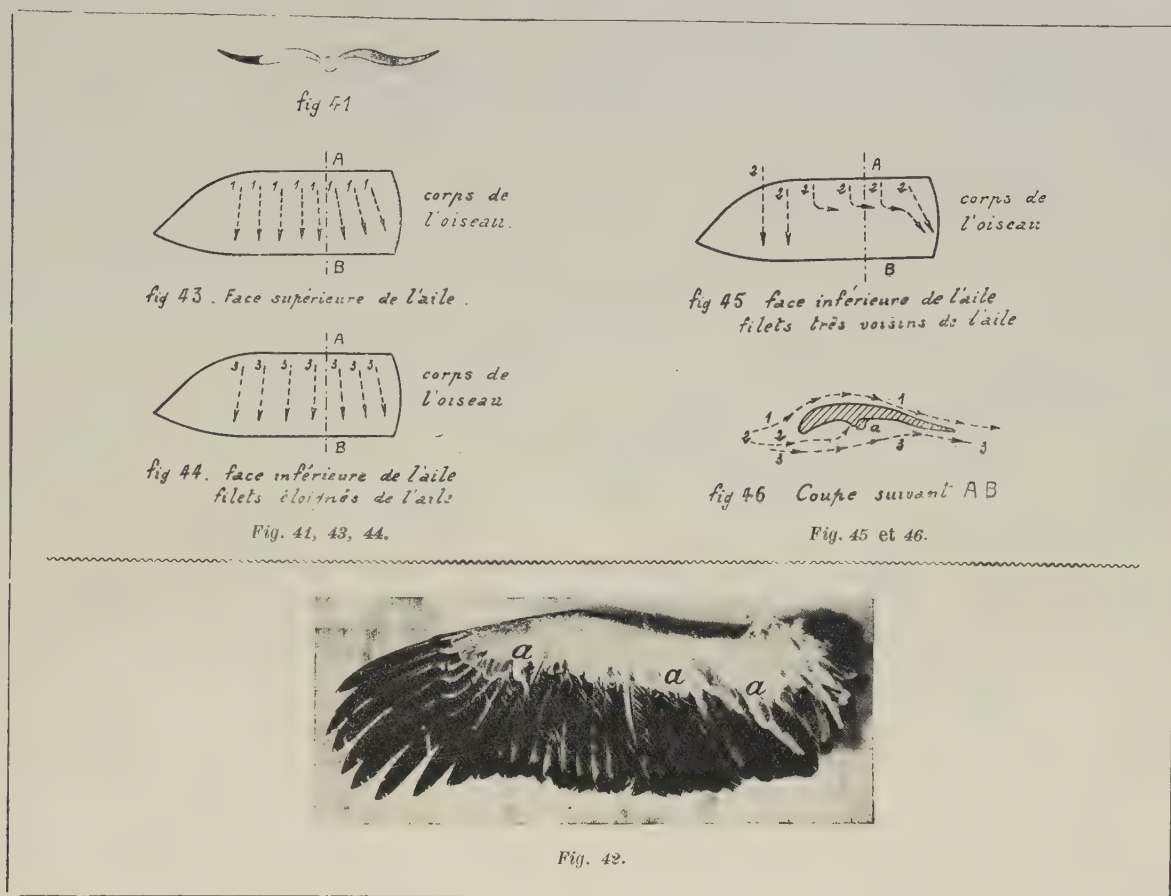
(3) V vitesse horizontale de l'oiseau par rapport à l'air.

v vitesse verticale de l'oiseau par rapport à l'air.

γ angle de glissement $= \frac{v}{V}$.

Il était donc intéressant de se rendre compte si les ailes des vautours se comportaient comme celles des planeurs ou modèles réduits d'aéroplanes habituellement construits.

Or, si dans ces derniers, on fait des sections planes de l'aile, par des plans verticaux parallèles à l'axe de l'appareil, ces sections sont indépendantes de la position des plans : de la sorte, les filets d'air passant au-dessus et au-dessous de l'aile ne sont pas déviés dans une direction perpendiculaire à un plan vertical contenant l'axe de l'appareil.



Il ne paraît pas en être de même pour l'oiseau dont l'aspect dans le sens du vol est approximativement celui indiqué sur la figure 41. C'est pourquoi nous nous sommes efforcés d'immobiliser après leur mort quelques ailes d'oiseau dans la position du vol à voile, afin de les étudier ultérieurement à la soufflerie. Malheureusement le formol employé pour les conserver a contracté leurs muscles et les rémiges extrêmes, particulièrement, ne sont plus dans leur position normale, ainsi qu'on peut le voir dans la photographie ci-contre (fig. 42).

Néanmoins, la partie médiane de l'aile est restée sensiblement dans sa position primitive et il nous a paru intéressant de faire quelques essais à la soufflerie de Saint-Cyr. Nous y avons constaté les faits suivants :

Sur la face supérieure de l'aile, les filets sont normalement déviés, quoique un peu vers le corps de l'oiseau dans la partie droite (filet marqué 1, fig. 43 et 46).

Sur la face inférieure de l'aile, les filets d'air situés tout contre la surface de l'aile sont déviés vers le corps de l'oiseau près d'une série de petites plumes situées en *a* (fig. 42) qui se soulèvent sous l'influence du vent (filets 2 des fig. 45 et 46).

Les filets plus éloignés (filets 3 des fig. 44 et 46) suivent une trajectoire normale tout en se rapprochant de l'aile de l'oiseau après le passage en dessous des plumes *a*.



CONCLUSION

Tels sont les premiers résultats de cette étude. Ils auront, je crois, permis de jeter un premier jour sur le mode d'utilisation par l'oiseau de l'énergie interne de l'air.

Il reste encore beaucoup à faire. Il faut d'abord compléter les caractéristiques des divers voiliers.

Il faudra également étudier la cause du vol si remarquable de l'albatros. Au dire de la plupart des savants et navigateurs qui l'ont observé, cet oiseau évolue **au loin des navires**, en pleine mer et des heures entières sans battre des ailes. Or, les régions où on le rencontre sont des régions froides correspondant, dans l'autre hémisphère, à nos latitudes et même beaucoup plus bas.

Utilisent-ils des plages à composante ascendante? La chose paraît au moins problématique. Une observation, mais une seule, de Froude (1) militerait en faveur de cette opinion. Il fait remarquer que fréquemment les albatros volent de préférence en rasant presque la surface de l'eau et en suivant la pente inclinée des vagues. Il a vu le fait se produire presque par calme plat. Froude émet l'opinion que, peut-être, l'oiseau utilise le courant ascendant dû à l'air placé au voisinage de la surface de la mer et qui nécessairement doit être soulevé avec la vague. Des nombres qu'il donne pour la vitesse des vagues, et leur hauteur, on peut conclure que l'oiseau ne pourrait utiliser qu'un courant ascendant de 0 m. 75 par seconde au plus. Si l'on prend pour vitesse horizontale de l'oiseau, par rapport à l'air, 20 mètres, nombre que l'on trouve indiqué dans un rapport de Hankin (2), ceci donnerait un angle de glissement de 1/27 environ, ce qui paraît bien faible, surtout quand on a sous les yeux, comme nous, un exemplaire d'un de ces oiseaux dont le corps volumineux a près de 30 centimètres de diamètre au milieu, se soutenant par des ailes extrêmement étroites de 0 m. 17 de largeur moyenne sur 1 m. 30 de longueur chacune.

De plus, quand on étudie les vents arrivant de la pleine mer, ils paraissent beaucoup moins sujets aux fluctuations d'inclinaison sur l'horizon que les vents de terre, du moins sous nos climats. Les observations que nous avons faites à ce sujet avec nos appareils sur les côtes de Bretagne pendant l'été de 1920, le montrent assez nettement. On trouve dans les vents venant du large des zones à composantes ascendantes et descendantes analogues à celles observées en Afrique, mais beaucoup plus rarement et avec beaucoup moins d'ampleur. Pourraient-elles suffire à expliquer les évolutions de l'albatros, ou bien y a-t-il autre chose? C'est un problème qui mérite d'être étudié, car cet oiseau est particulièrement intéressant en raison de son grand poids (8 à 9 k.), de la faible surface de ses ailes (0 mq. 40 à 0 mq. 50), et de sa grande vitesse qui le rapproche un peu plus de nos avions actuels. Des expériences faites sur place permettraient seulement de trancher la question. Elles font partie du programme que nous nous proposons de réaliser quand les circonstances et les moyens nous le permettront.

Enfin, lorsque nous aurons déterminé quelle est l'espèce d'oiseau qui possède les meilleures constantes aérodynamiques (Ky , Kx , γ), il s'agira d'en reproduire un modèle pour l'étudier à la soufflerie.

Il ne semble pas que, pour les grandes espèces d'oiseaux, on puisse tirer des exemplaires morts, des renseignements très intéressants. Certains muscles et tendons doivent, en effet, agir sur la cambrure transversale et la courbure des ailes que l'oiseau doit modifier de manière à prendre la forme la plus adéquate à son genre de vol. Les ailes des oiseaux empaillées sont maintenues par des fils de fer qui, certainement, ne permettent d'approcher que de loin des formes réelles, de faibles variations de profil ou de courbure pouvant donner, comme on le sait, des résultats très différents.

Le seul moyen pratique semble donc être de prendre en plein vol des **photographies simultanées en deux ou trois points différents** (3). La chose paraît assez facile dans le cas des oiseaux suivant les navires. Elle est évidemment plus compliquée à terre; on pourrait néanmoins, dans certains cas de vol sensiblement sur place, y arriver en Afrique où on peut approcher de très près les voiliers.

Ces photographies permettraient de construire un modèle avec exactitude. On aurait ainsi une base sérieuse pour une série d'études à la soufflerie de formes d'ailes donnant sans doute le meilleur rendement.

(1) FROUDE : « On the Soaring of Birds. » (*Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1888, tome 15, p. 256.)

(2) HANKIN : « On the flight of albatrosses and gannets ». (*Aeronautical Journal*, janvier 1915, p. 22.)

(3) L'idée de ce procédé photographique a déjà été suggérée par M. Archdeacon.

BIBLIOGRAPHIE

- BAZIN (A.) : « Théorie et imitation du vol à voile ». (*Revue Scientifique*, 17 juin 1905 et 24 juin 1905.)
- BOLLÉE (L.) : « Etude du vol à voile des oiseaux ». (*Aérophile*, 1917, p. 245.)
- COUSIN : « Le vol à voile ». (Vivien, éditeur, 1910.)
- FROUDE (W.) : « On the soaring of birds ». *Proceedings of Royal Society of Edinburg*, 1888, tome 15, p. 256 et 1891, tome 18, p. 65.)
- HANKIN : *Animal Flight*. (Hiffe and Sons, Ed. London, 1914.)
- « Of the flight of albatrosses and gannets » (*Aéronautical journal*, janvier 1915, p. 22.)
- « The probleme of Soaring flight ». (*Proceedings of the Cambridge philosophical Society*, vol. XX, 1920, p. 222.)
- HEADLEY : « The flight of birds » (Witherly and Co ed., London 1912.)
- HIRAM MAXIM : « Le vol naturel et le vol artificiel », traduit par Espitalier. (Dunod, éditeur, 1909.)
- LANCHESTER : « Le vol aérien Aerodonectic et Aérodynamique », 2 volumes, traduit par Benoît. (Gauthier-Villars, éditeur, 1914 et 1916.)
- LANGLEY : « The international Work of the Wind ». (Smithsonia contributions to Knowledge 1893.)
- LILIENTHAL : « Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst ». 1889.
- MOUILLARD : « L'Empire de l'air ». (Masson, éditeur, 1881.)
- « Le vol sans battement » ouvrage posthume. (Librairie aéronautique, 1912.)
- EMICHEN : Nos maîtres les oiseaux ».
- SÉE (A.) : « Le vol à voile et la théorie du vent louvoyant ». (*Aérophile*, 1^{er} juin 1909, p. 242.)
- SOREAU (R.) : « Le vol à voile et l'aviation ». (*Revue Scientifique*, 20 mars 1895.)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	5
CHAPITRE PREMIER. — Historique, description du vol à voile, théories diverses.....	6
CHAPITRE II. — Description des procédés expérimentaux employés pour étudier le vol à voile.....	8
1 ^{re} PARTIE. — Etude des sources d'énergie interne statique de l'air.....	9
Variations de température	9
Variations de pression.....	9
2 ^e PARTIE. — Etude des sources d'énergie interne dynamique de l'air.....	11
Irrégularités de vitesse du vent.....	11
Irrégularités de direction du vent.....	12
Composante verticale de vitesse du vent	13
A) Procédé du ballon sonde.....	13
B) Procédé du cerf-volant.....	16
CHAPITRE III. — Résultats expérimentaux obtenus	21
Régions explorées	21
Cause directe du vol à voile	21
Cause indirecte du vol à voile.....	23
Source primitive d'énergie	27
Qualités voilières des diverses espèces d'oiseaux.....	27
CONCLUSION	30
BIBLIOGRAPHIE	31

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Composition chimique des nébuleuses gazeuses

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 27 juin 1921

Le Doyen de la Faculté des Sciences :

MOLLIARD

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris :

P. APPELL

